Kosmos electronic X3000-X4000

Expermimentierbuch
für die Grundkästen
X 3000 und X 4000

kosmos®

2. Auflage
Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co.,
Stuttgart/1986

Technische Bildgestaltung: KOSMOS-Entwicklungslabor,
R. u. E. Köder und G. Bosch, Textillustration von A. Bott
Ausarbeitung des Textes, der Schaltungen und Versuche sowie Konstruktion der Experimentierausrüstung:
KOSMOS-Entwicklungslabor
Printed in Germany/Imprimé en Allemagne Fédérale/
L69BER
Produktgestaltung: Atelier Höllerer
Layout: Unter Mitarbeit von Siegfried Fischer, Stuttgart
Druck: Karl Stiller, Remseck 2

Experimentieranleitung kosmos®
electronic X 3000/X 4000

Dieses Experimentierbuch besteht aus 2 Teilen.
Die Besitzer des Kastens X 3000 können alle Experimente des ersten Teils durchführen.
Besitzer des Kastens X 4000 können *zusätzlich* die Experimente des zweiten Teils durchführen.

Zum Experimentieren werden eine, bei einzelnen Experimenten auch zwei 9-Volt-Batterien Type 6 F 22 gebraucht, die dem Kasten wegen ihrer begrenzten Lagerfähigkeit nicht beigegeben sind.

kosmos
Franckh'sche Verlagshandlung
Stuttgart

Kosmos electronic X 3000 Ⓘ

Teil I	Bestell Nr.
1. Steckplatte	60-7010.7
2. Zwei Taster je	60-0036.7
3. Batterie-Clip mit Stiftstecker .	60-4210.6
4. Ohrhörer	60-4205.6
5. Leuchtdiode (LED rot)	60-0205.8
6. Beutel lange Drahtbrücken ..	60-0029.2
7. Beutel kurze Drahtbrücken ..	60-0028.2
8. Beutel Steckfedern	60-0061.2
9. Zwei npn-Transistor-Module je	60-4300.6
10. Bündel Drahtabschnitte	60-4110.2
11. Mittelwellen-Modul	60-4301.6
12. Germanium-Diode	60-0203.8
13. Zwei Kondensatoren 6,8 nF je	60-0326.8
14. Elektrolytkondensator 100 µF	60-0334.8
15. Elektrolytkondensator 10 µF .	60-0335.8
16. Zwei Widerstände 470 Ω je ..	60-0435.8
17. Widerstand 1 kΩ	60-0430.8
18. Widerstand 5,6 kΩ	60-0405.8
19. Widerstand 15 kΩ	60-0432.8
20. Widerstand 33 kΩ	60-0413.8
21. Widerstand 100 kΩ	60-0425.8
22. Widerstand 220 kΩ	60-0434.8
23. Widerstand 680 kΩ	60-0442.8

Kosmos electronic X 3000 (II)

Teil II	Bestell Nr.
1. Dekorplatte DESK I	60-7001.6
2. Schaltpult	60-7015.7
3. Drei Zylinderblechschrauben je	60-2018.8
4. Zwei Verbindungsstifte je	60-8372.7
5. Drehknopf, groß	60-8371.7
6. Leuchtdiode (LED rot)	60-0205.8
7. Fototransistor (T_F)	60-0211.8
8. Beutel lange Drahtbrücken ..	60-0029.2
9. Beutel kurze Drahtbrücken ..	60-0028.2
10. Beutel Steckfedern	60-0061.2
11. Verstärker-Modul	60-4303.6
12. Lautsprecher	60-4201.6
13. Poti-Modul (P1)	60-4302.6
14. Elektrolytkondensator 1 µF ..	60-0305.8
15. Elektrolytkondensator 10 µF	60-0335.8
16. Kondensator 100 nF (0,1 µF)	60-0312.8
17. Widerstand 10 Ω	60-0450.8
18. Widerstand 100 Ω	60-0428.8
19. Widerstand 3,3 kΩ	60-0437.8
20. Widerstand 10 kΩ	60-0431.8

Kosmos electronic X 3000 (III)

Teil III	Bestell Nr.
1. Steckplatte	60-7010.7
2. Drei Zyl.-blechschrauben je	60-2018.0
3. Taster	60-0036.7
4. Zwei Verbindungsstifte je	60-8372.7
5. Drehknopf, klein	60-8373.7
6. Batterieclip mit Kabelschuh	60-4211.6
7. IR-Leuchtdiode	60-0201.8
8. Beutel lange Drahtbrücken	60-0029.2
9. Beutel kurze Drahtbrücken	60-0028.2
10. Zwei Beutel Steckfedern je	60-0061.2
11. Poti-Modul (P2)	60-4305.6
12. UKW-Modul	60-4304.6
13. Zwei Si-Dioden	60-0204.8
14. Elko 10 µF	60-0335.8
15. Zwei Elkos 100 µF	60-0334.8
16. Elko 470 µF	60-0333.8
17. Kondensator 100 nF	60-0312.8
18. Widerstand 150 Ω	60-0419.8
19. Widerstand 1,5 kΩ	60-0444.8
20. Widerstand 2,7 kΩ	60-0421.8
21. Widerstand 10 kΩ	60-0431.8
22. Widerstand 22 kΩ	60-0433.8

Kosmos electronic X 4000 (IV)

Teil IV	Bestell Nr.
1. Dekorplatte DESK II	60-7002.6
2. Schaltpult	60-7015.7
3. Drei Zyl.-blechschrauben je	60-2018.8
4. Zwei Verbindungsstifte je	60-8372.7
5. Taster	60-0036.7
6. Drehknopf, groß	60-8371.7
7. Transistor pnp	60-4306.6
8. Beutel lange Drahtbrücken	60-0029.2
9. Beutel kurze Drahtbrücken	60-0028.2
10. Beutel Steckfedern	60-0061.2
11. Vierfach-UND-NICHT-Gatter	60-4309.6
12. Operationsverstärker-Modul	60-4308.6
13. Schalterstreifen	60-4307.6
14. Meßinstrument	60-4219.6
15. Widerstand 1,2 Ω	60-0401.8
16. Widerstand 12 Ω	60-0412.8
17. Widerstand 10 kΩ	60-0431.8
18. Widerstand 39 kΩ	60-0423.8
19. Widerstand 1 MΩ	60-0451.8
20. Widerstand 1,5 MΩ	60-0471.8

KOSMOS OPERATOR DESK II

SIGNAL/METER

0

POSITION 1
RANGE 1

CONTROL

POSITION 2
RANGE 2

Die Teile des Kosmos electronic X 3000

Bild	Aufbaudarstellung / Schaltzeichen	Bild	Bezeichnung
	Lautsprecher		Schaltpult
	Potentiometer P1		Dekorplatte DESK I
	Potentiometer P2		Verbindungsstifte
	Batterieclip mit Schraubanschluß		Schrauben für Poti-Modul

Aufbaudarstellung		Schaltzeichen		
	Si-Diode			Steckplatte
	UKW-Modul			Steckfedern
	Verstärker–Modul			lange Drahtstücke
	Achtung! IR-Leuchtdiode nur mit Vorwiderstand verwenden!			Batterieclip mit Steckanschluß
	Fototransistor			Drehknöpfe

	Aufbaudarstellung / Schaltzeichen		Aufbaudarstellung / Schaltzeichen
	Drahtbrücke		Ohrhörer
	Taster		Widerstand
			Diode Ge
	Kondensator		**Achtung:** Leuchtdiode nur mit Vorwiderstand verwenden!
	Elektrolytkondensator		npn-Transistor
Kondensatoren: 1 pF = 1 Picofarad 1 nF = 1 Nanofarad (1000 pF) 1 μF = 1 Mikrofarad (1000 nF)	Widerstände: 1 Ω = 1 Ohm 1 kΩ = 1 Kilo-Ohm (1000 Ω) 1 MΩ = 1 Meg-Ohm (1000 kΩ)		Mittelwellen-Modul

Inhaltsverzeichnis

Ersatzteilbeschaffung

Sofern defekte oder verlorengegangene Teile nicht über den örtlichen Fachhandel zu bekommen sind, können sie bei **KOSMOS, Abt. Ersatzteile, Postf. 640, 7000 Stuttgart 1,** nachbezogen werden.
Wichtig! Bestellschein vorher mit Postkarte beim Verlag anfordern. Ersatzteillieferungen ohne Bestellschein können leider nicht ausgeführt werden.

B. Das KOSMOtronik-Stecksystem

Einstecken der Steckfedern

Dem Experimentierkasten electronic X 3000 liegen zwei Steckplatten bei, eine im Einsatzteil I und die andere im Einsatzteil II.

Beide Steckplatten müssen wir zunächst mit den Steckfedern bestücken. Auf der Abbildung B1 sehen wir, wie die Steckfedern in die Steckplatte eingesteckt werden. Die Federn rasten „hörbar“ in den Aussparungen ein.
Achtung! Eine der Steckplatten wird ganz bestückt, die zweite Steckplatte wird nur zum Teil bestückt (siehe dazu Abb. B2).
Bei dieser zweiten Steckplatte bleiben die Aussparungen 10, 20,30,40,50,60,70 und 11 unbestückt. Außerdem bleiben die 12 Aussparungen zwischen den Steckfedern 11 und 17 sowie die ganz untere Reihe frei.
Steckfedern für die freien Aussparungen sind im Kasten electronic X 4000 enthalten. Damit sind die Steckplatten, auf denen wir später die Schaltungen aufbauen werden, auch schon fertig. Die Steckplatte und die Steckfedern bilden zusammen die Grundelemente für das universelle KOSMOtronik-Stecksystem. In die Steckfedern können die verschiedenen Bauelemente direkt oder über Module eingesteckt werden. Die Steckfedern stellen dabei den elektrischen Kontakt zwischen den einzelnen Bauteilen her und geben gleichzeitig den notwendigen mechanischen Halt. Hier noch ein Hinweis: die Anschlußbeine und Drähte sollten **stets senkrecht** in die Steckfedernlöcher eingesteckt werden. Auch

sollten die Drahtenden nicht verbogen sein, da sonst die Gefahr besteht, daß sich diese „Korkenzieher“ in den Steckfedern verhaken und sie beschädigen.
Im Experimentierkasten electronic X 3000 sind alle Bauteile so vorbereitet, daß sie sofort eingesteckt werden können. Da unsere Schaltungen aber nicht nur aus Widerständen und Kondensatoren bestehen, sondern auch aus ganz einfachen Drahtbrücken, die dem Kasten ungebogen beiliegen, wollen wir diese als nächstes biegen.

Biegen der Drahtbrücken

Dem Kasten electronic X 3000 liegen kleine Beutel mit kurzen und langen Drahtstücken bei, diese werden wir nun Schritt für Schritt nach den folgenden Abbildungen biegen. Wir beginnen mit den längeren Drahtstücken.

Damit die Brücken nach dem Biegen gut aussehen, das heißt nicht schief werden, müssen wir Isolation sauber auf den Draht schieben. Fehlen von einem oder von beiden Enden die Isolationsstückchen, sollten wir darauf achten, daß die blanken Drahtenden gleich lang sind. Sind sie verschieden lang, kann die Isolation entsprechend verschoben werden (Abb. B3).

(A) Zunächst stecken wir das Drahtstück in das kleine Loch auf dem Steg, oberhalb des KOSMOS Schriftzuges (Abb. B4).

(B) Wir biegen das Drahtstück dann rechtwinkelig zum Plattenrand ab, wie es die Abb. B5 zeigt.

(C) Mit dem nächsten Arbeitsschritt biegen wir die Drahtbrücke fertig (Abb. B6).

(D) Zum Schluß ziehen wir von beiden Drahtenden die kleinen Isolationsstückchen ab, damit sieht unsere Drahtbrücke so aus, wie es Abb. B7 zeigt. Sie hat ein **Rastermaß** von genau 30 mm und wird bei unseren Versuchsaufbauten als **lange Drahtbrücke** bezeichnet.

Abb. B8 zeigt, wie die kurzen Drahtbrücken gebogen werden. Die kurzen Drahtstücke stekken wir dazu in das kleine Loch unterhalb des Steges. Auch hier führen wir die Arbeitsschritte A – D der Reihe nach aus. Diese Brücken haben ein Rastermaß von 15 mm und werden als **kurze Drahtbrücken** bezeichnet. Damit sind die Drahtbrücken vorbereitet, wir brauchen nur noch die 9V-Batterie anzuschließen und können dann unsere erste Versuchsschaltung aufbauen.

Achtung!

Die blanken Enden der Batterieanschlußleitungen dürfen sich nicht berühren (Kurzschluß!).

Anschließen der 9V-Batterie

Die 9V-Batterie Type 6 F 22 wird, wie es die Abbildung B9 zeigt, mit dem Batterieclip verbunden und in das Batteriefach am Steckplattenrand eingelegt. Wir müssen dazu den Batterieclip mit den kleinen Rundsteckern verwenden; der Batterieclip mit den Kabelösen ist für die Montage im Pultgehäuse vorgesehen. Die rote Leitung ist Plus, die schwarze Leitung Minus.

1. Mitten hinein in die Elektronik...

soll uns dieses Experimentierbuch führen, und zwar auf dem kürzesten und interessantesten Weg. Wir wollen uns nicht durch langatmige Erklärungen aufhalten lassen, sondern sofort mit dem Experimentieren beginnen. Schon die ersten Versuche zeigen uns, daß man mit wenigen Bauteilen interessante elektronische Schaltungen aufbauen kann. Mit jedem weiteren Experiment wachsen praktische Erfahrung und theoretisches Wissen, so daß wir am Ende aller hier beschriebenen Versuchsreihen in der Elektronik zuhause sind.

Einige der elektronischen Bauteile sind empfindlich, sie nehmen eine falsche Behandlung übel. Folgende Bauelemente dürfen niemals ohne weiteres an die Stromversorgung (Batterie oder Netzteil) angeschlossen werden. (Bild 1):

die Transistoren
die Germanium- und Siliziumdioden
das Verstärker-Modul
der Foto-Transistor
die Infrarot-Diode
die Leuchtdioden

Bild 1. Bauelemente, die niemals ohne weiteres an die Batterie angeschlossen werden dürfen

Die Warnung gilt besonders für die Leuchtdioden (Bild 2), die von Anfängern häufig mit Lämpchen verwechselt werden.

Bild 2. Leuchtdioden nie ohne Schutzwiderstand betreiben!

Bild 3. Bauteile für den Warnblinker

1.1 Sechs Bauteile genügen: Ein elektronischer Warnblinker mit Integriertem Schaltkreis

Es werden folgende Bauteile benötigt (Bild 3):
Verstärker-Modul
Isolierplatte (siehe Einhefter)
Leuchtdiode (LED rot)
Kondensator 100 Mikrofarad (100μF)
Widerstand 15 Kilo-Ohm (Farbcode: braun-grün-orange)
Widerstand 100 Kilo-Ohm (Farbcode: braun-schwarz-gelb)
Widerstand 470 Ohm (Farbcode: gelb-violett-braun)
kurze und lange Drahtbrücken.

Die Bauteile werden entsprechend Bild 4 eingesteckt.

Bild 4. Aufbau zu Schaltung 5

Isolierplatte unterlegen

Obwohl nur aus einem halben Dutzend Bauteilen bestehend, stellt unsere Warnblinkanlage eine technische Meisterleistung dar: Die Leuchtdiode geht unablässig an und aus, sie blinkt stunden-, tage-, wochen- und monatelang, ohne menschliches Zutun und ohne, daß ein mechanischer Kontakt bewegt wird.
Unsere Leuchtdiode blinkt etwa zweimal pro Sekunde, das heißt, sie wird 172.800 mal am Tag ein- und ausgeschaltet. Würde man versuchen, eine derartige Blinkleistung mit einem herkömmlichen Lichtschalter zu erzielen – wir nehmen eine Lebensdauer von 1 Million Schaltvorgängen an – dann würde dieser nicht einmal eine Woche lang durchhalten.
Das Herz des Warnblinkers ist das Verstärker-Modul. Warum für eine Blinkschaltung ein Verstärker benutzt wird und wie die Sache funktioniert, wird später erklärt.
An dieser Stelle sei soviel verraten: der eigentliche Verstärker ist das kleine schwarze Kästchen auf dem Modul. In seinem Innern enthält er keine einzeln zusammengelöteten Bauteile, er ist vielmehr eine Integrierte Schaltung (Englisch: Integrated Circuit = IC), bei der nach einem speziellen, hochkomplizierten Verfahren auf einem winzigen, nur wenige Quadratmillimeter großen Halbleiterplättchen (Chip) die Bauteile vereint werden: 17 Transistoren, 6 Widerstände und 4 Dioden.

1.2 Das Schaltbild – Bauanleitung im Telegrammstil

In unserem Experimentierbuch bringen wir zu jeder Schaltung zwei verschiedene Abbildungen, und zwar Aufbaubild und Schaltbild. Das Aufbaubild soll uns den Aufbau erleichtern und zeigen, wie die Teile auf der Steckplatte angeordnet sind und wie die Leitungen liegen sollen.

Bild 5. Warnblinker

Das Schaltbild zeigt dagegen in vereinfachter Weise, welche Teile zusammengeschaltet sind und nimmt dabei keine Rücksicht auf deren räumliche Lage. Es dient der Erleichterung der Funktionserklärung. Schaltbilder werden gelegentlich in der Fachliteratur auch Stromlaufpläne genannt.

Bild 5 zeigt das Schaltbild zu unserem elektronisch gesteuerten Blinklicht. Das Verstärkermodul ist der Einfachheit halber nur durch ein Dreieck dargestellt, obwohl sich auf dem Platinchen zusätzlich noch einige Kondensatoren und ein Widerstand befinden, die für die Funktion des Verstärkers erforderlich sind. Wir betrachten das komplette Modul als Verstärkereinheit, und da Verstärker in der Elektronik stets durch ein Dreieck symbolisiert werden, wollen wir es auch so halten.

1.3 Masse ohne Kilogramm

Die Elektroniker werfen immer mit dem Wort „Masse“ um sich. Das Wort Masse stammt aus den Zeiten von Opas „Dampfradio“. Diese Geräte hatten immer ein festes und schweres Metallchassis, das mit einem Pol der Stromversorgung verbunden war. Dasselbe Prinzip finden wir heute noch beim Auto. Ein Blick unter die Haube zeigt, daß von einem Pol der Autobatterie ein dickes Massekabel zum Motorblock führt. Hier kann man sich unter „Masse“ etwas vorstellen (Bild 6)!

Opas Radio ist verschwunden, geblieben ist in der Elektronik der Begriff der Masse. Was ist damit gemeint?

Die Antwort ist einfach: Als Masse legt der Elektroniker denjenigen Pol einer Batterie fest, auf den er alle seine Spannungsangaben innerhalb einer Schaltung beziehen will. Welcher Pol dies ist, spielt im Prinzip keine Rolle, allerdings hat es sich bei modernen Elektronikschaltungen eingebürgert, den Minuspol zur Masse zu erklären und alle Spannungsmessungen gegen den Minuspol (also gegen Masse) vorzunehmen. „Minus gleich Masse“, das kann man sich gut merken!

Bild 6. Beim Auto kann man sich unter Masse noch etwas vorstellen!

Bild 7. Doppelwarnblinker

1.4 Aus eins mach zwei: Wechselblinker

Im Aufbaubild 7 finden wir grau unterlegt eine zweite Leuchtdiode (in Schaltbild 5 gestrichelt eingezeichnet) mit ihrem Vorwiderstand (470 Ohm; Farbcode: gelb-violett-braun). Wenn wir diese beiden Bauteile zusätzlich einstecken, wird aus dem einfachen Blinker ein Wechselblinker: während die eine Leuchtdiode angeht, geht die andere aus.

Für die Verwendung in weiteren Experimenten lassen wir den Wechselblinker aufgebaut, wollen nun jedoch zunächst mit ein paar Handgriffen das Pultgehäuse montieren.

2. Montage des Pultgehäuses

Wir wollen nun das Pultgehäuse mit dem Lautsprecher, der Batterie und den Potentiometern bestücken. Wir legen uns dazu folgende Teile zurecht:
Das Schaltpult,
den Lautsprecher,
die Dekorplatte,
den Potistreifen P1,
den Potistreifen P2,
den Battericlip mit Kabelschuhen,
den großen Drehknopf,
den kleinen Drehknopf,
die Verbindungsstifte
und die kleinen Schrauben.
Darüberhinaus werden noch ein kleiner Schraubenzieher, ein Küchentuch und etwas Haushaltsspülmittel benötigt.
Zuerst wird mit Spülmittel und Wasser die Schaltpultoberseite abgewaschen. Dies ist notwendig, damit später die Klebeschicht der Dekorplatte gut hält. Durch das Spritzgießen können nämlich auf dem Pultgehäuse Spuren von Fett und Trennmittel sein.
Wichtig! Das Spülmittel muß mit viel Wasser wieder abgewaschen und anschließend gut trockengerieben werden.
Wir beginnen dann mit dem Einbau des Lautsprechers. Die Abbildung B10 zeigt, wie der Lautsprecher von oben in das Pultgehäuse eingelegt wird. Die beiden Anschlußleitungen sollen dabei zur Pultvorderseite (nach unten) herausgeführt werden.

B10

Wir nehmen dann die Dekorplatte und lösen von der Rückseite das Schutzpapier ab. Wenn wir eine Ecke der Dekorplatte vorsichtig in beide Richtungen biegen, läßt sich das Papier anfassen und leicht abziehen (Abb. B11).
Wichtig! Die Klebefläche nicht mit den Fingern berühren.

B11

Die Dekorplatte wird nun vorsichtig in die Vertiefung des Pultgehäuses eingepaßt und angedrückt (Abb. B12).
Wichtig! Im Bereich des Lautsprechers dürfen wir nur am Rand drücken, da sonst die Dekorplatte mit der Lautsprechermembran verkleben kann.

B12

Wir drehen nun das Pultgehäuse um und legen zunächst den Potistreifen P1 so ein, daß die Leiterbahnen und die fünf Stifte nach oben zeigen (siehe Abb. B13). Der Streifen P1 wird an der linken Seite des Schaltpultes (neben dem Lautsprecher) befestigt. Gehalten wird der Potistreifen an der einen Seite von zwei Schrauben; direkt unter die Schraubenköpfe werden die beiden Ösen der Lautsprecherleitungen geklemmt. Die Abbildungen B13 und B14 zeigen, wo die Schrauben eingedreht werden müssen. Zuerst alle Schrauben leicht eindrehen und dann nacheinander festziehen.
Wichtig! Die beiden Leitungen an den Leiterbahnen links außen festschrauben und zwar so, daß die Ösen auf der Leiterbahn liegen.

B14

B13

Als nächstes legen wir den Potistreifen P2 ein, die Abbildung B 15 zeigt, daß dieser Streifen an der rechten Pultseite montiert wird. An die beiden linken Leiterbahnen schrauben wir die Ösen des Batterieclips. **An die linke, äußere Leiterbahn kommt die schwarze Leitung (-), an die danebenliegende Leiterbahn kommt die rote Leitung (+).**

Wichtig! Diese beiden Anschlüsse dürfen wir keinesfalls vertauschen, da sonst später unsere Schaltungen nicht funktionieren, ja sogar Bauteile beschädigt werden können.

Die beiden Potistreifen werden am Pultrand jeweils von einer weiteren Schraube gehalten, diese wollen wir jetzt eindrehen.

Wir können nun die 9V-Batterie an den Clip anstecken und in die vorgesehene Halterung einklemmen (siehe Abb. B 15).

Als nächstes können wir die Drehknöpfe einstecken; dazu drehen wir das Pultgehäuse um. Die Potiaufnahme und die Drehknopfachsen passen nicht in jeder Stellung zusammen. Deshalb drehen wir zuerst die Potiaufnahmen mit einem kleinen Schraubenzieher so, wie es die Abbildung B 16 zeigt (Blick von der Dekorplatte auf P1).

Die beiden Drehknöpfe werden dann von oben eingesteckt, wie es die Abbildung B 17 zeigt. Dabei achten wir darauf, daß die Markierungspunkte jeweils auf die Zahl 3 zeigen. Damit beim Eindrücken der Potistreifen nicht beschädigt wird, drücken wir von unten dagegen.

Schaltpult an die Steckplatte montieren

Das fertig montierte Schaltpult wird nun an die voll mit Steckfedern bestückte Steckplatte angesteckt. Die Steckplatte soll mit dem KOSMOS-Schriftzug zum Schaltpult zeigen.
Das Schaltpultgehäuse wird von oben auf die Steckplatte aufgesteckt, dabei müssen die zehn Kontaktstifte in die entsprechenden Steckfedernlöcher eintauchen (siehe Abb. B18).

B18

B19

Batterie 9V

Wir können jetzt die Einheit Schaltpult/Steckplatte vorsichtig umdrehen und von unten in die äußeren Führungen jeweils einen Verbindungsstift einstecken (siehe Abb. B19). Damit ist die Montagearbeit abgeschlossen.

Wichtig! Anstelle der Batterie kann man auch das KOSMOS Netzgerät X anschließen, dann muß aber unbedingt die Batterie abgeklemmt werden.

3. Blinken, Knacken, Durchgang prüfen

3.1 Eine Knack-Blink-Schaltung

Aus dem Wechselblinker wird ein Gerät mit optischen *und* akustischen Signalen, wenn wir die Leuchtdiode LED 1 mit ihrem Vorwiderstand herausziehen und den Lautsprecher mit einem vorgeschalteten Kondensator anschließen; außerdem muß die Batterie, die sich ja jetzt unten im Pultgehäuse befindet, über ein paar Drahtbrücken mit der Schaltung verbunden werden. Abbildung 9 zeigt den Aufbauplan und Abbildung 8 das Schaltbild dazu.

Bild 8. Knack-Blink-Schaltung

Jedesmal, wenn die Leuchtdiode LED 2 an- oder ausgeht, ertönt ein Knackgeräusch. Man könnte eine solche Anordnung als Metronom (also als Taktgeber) für Musikfreunde benutzen, und wir werden später sehen, daß es auch möglich ist, die „Taktgeschwindigkeit" stufenlos einzustellen – vom Blues bis zum Rock'n Roll.

Übrigens: Die **Drahtbrücke S** zwischen Steckfeder 62 und der Steckfeder am Pluszeichen des Pultgehäuses kann **als Ein- und Ausschalter** benutzt werden. Soll das Gerät abgeschaltet werden, zieht man die Brücke einfach heraus.

Bild 9. Aufbau zu Schaltung 8

3.2 Der Verstärker erzeugt Töne

Die Vielseitigkeit unserer ersten Experimentierschaltung kann nun weiter auf die Probe gestellt werden. Der 100-μF-Kondensator wird herausgezogen und durch einen 100-nF-Kondensator ersetzt (manchmal ist dieser Kondensator auch mit 0,1μF oder nur mit 0.1 beschriftet).

Sofort ertönt ein gellendes Alarmsignal. Diese Schaltung wird für verschiedene Alarmanlagen noch gute Dienste leisten. Man bezeichnet sie auch als Tongenerator (= Tonerzeuger).

Natürlich ist die Tonhöhe auch veränderbar. Wenn wir einen zweiten 100-nF-Kondensator (er kann auch mit 0.1 μF beschriftet sein) einstecken – er ist in Aufbaubild 9 gestrichelt gezeichnet – so wird der Ton wesentlich tiefer.

3.3 Leitfähigkeit hörbar machen: Ein Durchgangsprüfer

Für unsere weiteren Betrachtungen über das Wesen des elektrischen Stromes wird sich ein sogenannter Durchgangsprüfer als außerordentlich vorteilhaft erweisen: Mit ihm werden wir prüfen können, ob Gegenstände leitend oder nichtleitend sind.

Der Tongenerator wird dazu etwas umgebaut (Aufbaubild 11, Schaltbild 10): Die Drahtbrücke zwischen Steckfeder 22 und Steckfeder 24 sowie die Leuchtdiode mit ihrem Vorwiderstand werden herausgezogen und ein langes Drahtstück in Steckfeder 22 und ein zweites in Steckfeder 24 gesteckt. Wir werden diese Drahtstücke als „Meßschnüre“ benutzen. Ein Funktionsversuch kann schon jetzt gemacht werden: Halten wir die beiden blanken Enden der Drahtstücke zusammen, so ist sofort ein Ton zu hören.

Der Durchgangsprüfer bleibt aufgebaut stehen, während wir uns zunächst einem weiteren kleinen, aber aufschlußreichen Experiment zuwenden.

4. Die elektrische Leitung

4.1 Leiten oder nicht leiten, das ist die Frage

Elektrischen Strom kann man nicht sehen, aber seine Wirkungen z.B. durch Anzeigegeräte sichtbar machen. Dies ist in unserem ersten Versuch beim Warnblinker durch die Leuchtdiode erfolgt.

Für weitere Versuche bauen wir auf der zweiten Aufbauplatte eine Meßschaltung nach Abbildung 12 und 13 auf. Um sie mit Strom zu versorgen, lösen wir die Batterie aus der Halterung des Pultgehäuses, ziehen den Batterie-Clip ab und

Bild 10. Durchgangsprüfer

Bild 11. Aufbau zu Schaltung 10

stecken den zweiten Batterie-Clip (im Experimentiermaterial enthalten) auf.
Es geht hier um das Einfachste vom Einfachen: Die gesamte „Schaltung“ besteht lediglich aus einer Leuchtdiode und dem Vorwiderstand *R*x. Das x bedeutet dabei, daß für diesen Widerstand verschiedene Werte ausprobiert werden sollen.
Wir stecken der Reihe nach ein:

470 Ohm (gelb-violett-braun)
1 k-Ohm (braun-schwarz-rot)
1,5 k-Ohm (braun-grün-rot)
3,3 k-Ohm (orange-orange-rot)
5,6 k-Ohm (grün-blau-rot)
10 k-Ohm (braun-schwarz-orange)
15 k-Ohm (braun-grün-orange)
33 k-Ohm (orange-orange-orange)

Bild 12. Einfacher Stromkreis

Wir stellen fest: Beim kleinsten Widerstand (470 Ohm) fließt offensichtlich ein großer Strom (Leuchtdiode brennt hell), beim größten Widerstand (33 k-Ohm) dagegen nur ein ganz schwacher Strom (Leuchtdiode glimmt).
Durch Einsetzen verschiedener Widerstände in den Stromkreis kann man also die Stärke des Stromes beeinflussen: Der 33-K-Ohm-Widerstand ist offensichtlich ein schlechterer Leiter als der 470-Ohm-Widerstand.
Wenn wir *R*x ganz weglassen und dafür nichts anderes einsetzen, befindet sich zwischen x und y nur Luft und natürlich der Kunststoff, aus dem die Steckplatte hergestellt ist. Kunststoff und Luft sind außerordentlich schlechte Leiter, man bezeichnet sie als Nichtleiter oder Isolatoren.
Bild 14 zeigt einige Beispiele, wie wir mit unse-

Bild 13. Aufbau zu Schaltung 12

Bild 14. Prüfen verschiedener Gegenstände auf Leitfähigkeit

rem Durchgangsprüfer (gemäß Aufbaubild 11) prüfen können, was Leiter und was Nichtleiter sind (nicht vergessen, die Batterie wieder einzubauen!).
Halten wir die beiden Drähte z.B. auf einen Schlüssel, so gibt der Durchgangsprüfer einen Ton ab. Der Schlüssel ist aus Metall, also leitet er. Alles, was wir gerade in Griffweite haben, können wir ausmessen: bei Gegenständen, deren Widerstand geringer als etwa 2 k-Ohm ist, wird der Durchgangsprüfer einen Piepser von sich geben. Auch der menschliche Körper leitet den elektrischen Strom, aber wesentlich schlechter als ein Metallgegenstand. So schwache Ströme, wie wir sie in diesem Experiment verwenden, kann unser Nervensystem noch nicht wahrnehmen. Sie sind absolut ungefährlich. Berühren wir z.B. – während der Durchgangsprüfer piepst – mit angefeuchtetem Daumen und Zeigefinger die blanken Enden des 100-k-Ohm-Widerstandes *R*2 des Durchgangsprüfers, so wird der Ton tiefer als Zeichen dafür, daß über unseren Körper ein außerordentlich schwacher, aber doch meßbarer Strom fließt.

4.2 Die Teilchen des Unteilbaren

Atomos, das Unteilbare, war in der griechischen Naturphilosophie der Ausdruck für das kleinste Teilchen der Materie. Der Name ist geblieben, unsere Vorstellungen von der kleinsten Einheit der Stoffe haben sich grundlegend gewandelt. Wir wissen heute, daß Atome selbst aus Teilchen bestehen: Aus dem Atomkern mit positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen; dieser ist von einer Hülle umgeben, die aus negativ geladenen Elektronen besteht. Die Elektronen umkreisen mit extrem hoher Geschwindigkeit den Atomkern in verschiedenen, abgestuften Abständen. Entsprechend diesen Abstufungen stellt man sich die Elektronenhülle so vor, als sei sie wie bei einer Zwiebel aus verschiedenen übereinanderliegenden Schalen zusammengesetzt (Bild 15).
Wir haben damit nur ein einzelnes Atom betrachtet. Wie sieht es aber aus, wenn mehrere Atome beieinander sind, z.B. in einem Kupferdraht?
Man kann sich die Atome als winzige Kugeln vorstellen, der Kupferdraht besteht dann aus dichtgepackten Kugeln. Diese liegen jedoch nicht regellos beieinander, sondern sind nach einem räumlichen Muster angeordnet, das man als **Kristallgitter** bezeichnet (Bild 16).
Bei einer derartigen Anordnung überschneiden sich die äußeren Schalen benachbarter Atome, so daß die Elektronen dieser Außenschalen nun nicht mehr einem einzelnen Atom zugehörig sind, sondern gemeinsame Elektronen der Nachbaratome sein können.
Bei Metallen sind die Elektronen der Außenschalen so beweglich, daß sie von einem Atom zum anderen überspringen und durch das Metallgitter wandern können. Wandern diese beweglichen Elektronen in eine bestimmte Richtung, dann fließt ein elektrischer Strom.

Bild 15. Rutherford-Bohrsches Atommodell eines Stickstoffatoms. Auf der Außenschale befinden sich fünf Elektronen.

Bild 16. Hexagonales Kristallgitter. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Überschneidungen der äußeren Kugelschalen nicht gezeichnet.

Ein Stoff kann also nur leiten, wenn bewegliche Elektronen vorhanden sind. Aber selbst bei den Metallen, die alle bewegliche Elektronen besitzen, gibt es Unterschiede in der Leitfähigkeit. Sie hängen mit dem Aufbau des Atomgitters zusammen.
Bei ihrer Wanderung durch das Atomgitter sind die Elektronen einem Reibungswiderstand ausgesetzt. Die Größe dieser Reibung ist von Metall zu Metall verschieden groß. Je größer dieser Widerstand, desto geringer die Leitfähigkeit. Beide Größen stehen also zueinander im umgekehrten Verhältnis, mathematisch ausgedrückt:

(F1) $$\text{Leitfähigkeit} = \frac{1}{\text{Widerstand}}$$

Die Leitfähigkeit wird in Siemens, abgekürzt S, gemessen, der Widerstand in Ohm, abgekürzt Ω (Omega).

5. Die elektrische Spannung

5.1 Die Kraft, die Elektronen schiebt

Wir haben erfahren, daß die Wanderung der Elektronen in einer Richtung das Fließen eines elektrischen Stromes darstellt. Nun wird es höchste Zeit zu fragen, was die Elektronen eigentliche dazu veranlaßt, in eine bestimmte Richtung zu wandern.
Die Antwort ist gar nicht so schwierig: Kein Gegenstand bewegt sich ohne Einwirkung einer Kraft. Die Kraft, die Elektronen schiebt, heißt elektrische Spannung und wird mit dem Buchstaben *U* bezeichnet, ihre Größe in Volt (Abkürzung V) angegeben (zu Ehren des italienischen Physikers Graf Alessandro Volta, 1745 – 1825). Wir kennen den Begriff der elektrischen Spannung von Batterien und von der Steckdose.
Was elektrische Spannung ist, können wir uns anhand der Bilder 17 und 18 klarmachen.
In einen Wasserkreislauf ist eine Pumpe eingebaut, die einen Druck erzeugt (Bild 17). Solange der Schieber im Rohr ist, kann sich das Wasser in den Leitungen nicht bewegen, sondern drückt lediglich gegen den Schieber. Die rechte Bildhälfte zeigt die entsprechenden Verhältnisse im elektrischen Stromkreis: Die Batterien liefern eine elektrische Spannung, ein Strom kann jedoch nicht fließen, da zwischen die beiden Kontaktfedern ein Stück Kunststoff (Isolator) geschoben ist.
Abbildung 18 zeigt, was passiert, wenn der Schieber bzw. der Isolator herausgezogen wird.
Das Wasser bewegt sich in den Leitungen fort und treibt die Turbine an. Im elektrischen Kreis fließt ein Strom und bringt das Lämpchen zum leuchten. So wie der Kupferdraht der elektrischen Leitung einen äußerst geringen, aber doch meßbaren Widerstand hat, besitzt auch unsere Wasserleitung durch die eingelagerten Kieselsteine einen Widerstand.

Bild 17. Unterbrochener Kreislauf

Bild 18. Strom fließt; so wie der Kupferdraht selbst auch einen geringen Widerstand hat, wirken die Kieselsteine hemmend auf den Wasserfluß.

Das Gedankenexperiment wird fortgesetzt, indem in den Wasserkreislauf eine zusätzliche Sandpackung eingefüllt und in den Stromkreis ein Bauteil, das wir bereits unter der Bezeichnung Widerstand kennengelernt haben, eingefügt wird (Bild 19).

Der Strom fließt nun in beiden Systemen langsamer, die Turbine dreht sich nicht mehr so schnell, das Lämpchen leuchtet schwächer.

Was müßte man tun, um den Druck in der Wasserleitung bzw. die elektrische Spannung im Stromkreis zu erhöhen?

Für den Wasserkreislauf besorgen wir uns eine zweite Pumpe, beim Stromkreis wird eine zweite (oder mehrere) Batterie benötigt und mit der ersten „in Reihe geschaltet", wie es der Fachmann ausdrückt.

Bild 19. Eine Sandpackung im Wasserkreislauf ergibt einen zusätzlichen Widerstand.

5.2 Mehr Spannung durch Reihenschaltung

Abbildung 20 zeigt das „Innenleben" des von uns verwendeten 9V-Batterieblocks. Wir entdekken darin zu unserem Erstaunen 6 kleine Einzelbatterien, von denen jede 1,5V abgibt. Alle diese 1,5V-Batterien sind in Reihe geschaltet, so daß sich die Gesamtspannung aus der Summe der Einzelspannungen ergibt:

Bild 20. Der 9V-Energieblock wurde geöffnet.

(F2) $$U_{ges} = U1 + U2 + U3 + \ldots + \ldots$$

oder in Zahlenwerten ausgedrückt:

9V = 1,5V + 1,5V + 1,5V + 1,5V + 1,5V + 1,5V.

5.3 Plus ist wenig und minus ist viel

Wir wissen jetzt, daß der elektrische Strom durch die Bewegung von Elektronen, den negativ geladenen Teilchen der Materie, zustande kommt. Am Minuspol der Batterie herrscht Elektronenüberschuß, am Pluspol Elektronenmangel. Die Elektronen bewegen sich vom Minuspol zum Pluspol. Trotzdem wird in vielen Lehrbüchern behauptet, der Strom fließe von plus nach minus, was eigentlich auch mit unseren Vorstellungen von plus = viel und minus = wenig übereinstimmen würde.

Wo liegt der Fehler?

Die sich offensichtlich widersprechenden Aussagen sind historisch begründet. Elektrizität wurde schon zu einer Zeit beobachtet, als man über den Aufbau der Materie sehr wenig wußte.

Die Gedankengänge der Pioniere der Elektrizität (des Amerikaners Benjamin Franklin und des

Deutschen Georg Christoph Lichtenberg) können wir in einem sehr einfachen Versuch mit Reibungselektrizität nachvollziehen:
An einem Tag mit trockener Luft nehmen wir ein Kunststofflineal (Polystyrol) und reiben es mit einem trockenen Baumwoll-Taschentuch (Bild 21). Dabei lädt sich das Lineal negativ auf, d.h., seine Oberfläche „kratzt Elektronen aus dem Taschentuch heraus", die nun dicht gedrängt auf seiner Oberfläche sitzen und auf eine Gelegenheit warten, von dort abzuspringen. Nähern wir das aufgeladene Lineal langsam unserer Nasenspitze, so fühlt es sich an, als stießen wir mit dem Gesicht in ein Spinnengewebe. Was wir fühlen, sind die vom Lineal auf uns überspringenden Elektronen, mit denen wir nun auf diese Weise persönlichen Kontakt aufgenommen haben.
Man hielt diese Teilchen für positive Ladungsträger. Daß den Ladungsträgern, den Elektronen, später ein negatives Vorzeichen zugeordnet wurde, bringt auch heutezutage noch Elektroniker in Schwierigkeiten.
In der Technik hat man jedoch bis heute die einmal festgelegte Stromrichtung beibehalten und spricht von technischer Stromrichtung von plus nach minus, wohlwissend, daß die Bewegung der Ladungsträger, der negativen Elektronen, vom Minuspol zum Pluspol erfolgt.

Bild 21. Erzeugung von Reibungselektrizität

5.4 Elektronische Geisterbeschwörung

Viel Unfug wird mit der Neigung argloser Mitmenschen zu okkulten Dingen getrieben, und so manches Portemonnaie bekam die Schwindsucht, weil ein Wissenschafts-Scharlatan seinen Besitzer mit scheinbar übersinnlichen Effekten verblüffte und dafür kräftig abkassierte.
Wir wollen eine spiritistische Séance auf elektronische Weise durchführen und bauen dazu die Schaltung nach Bild 22 auf. In Steckfeder 43 wird ein 15 cm langes Drahtstück wie eine Stabantenne etwa senkrecht eingesteckt (Schaltbild 23). Das Experiment, zu dem wir Schuhe mit Leder- oder Gummisohlen tragen sollten, wird in einem Raum mit Teppichboden durchgeführt: wir stel-

Bild 23. Elektronische Geisterbeschwörung

Bild 22. Aufbau zu Schaltung 23

len das Gerät auf den Tisch, setzen uns davor, formen aus Daumen und Zeigefinger ein „O“ und umschließen das senkrechte Drahtstück mit diesem O, natürlich ohne irgendeinen Teil der Schaltung zu berühren. Jetzt scharren wir ein paar Mal kräftig mit den Füßen. Die Geisterbeschwörung wirkt: die Leuchtdiode beginnt, geheimnisvoll zu flackern.

Wer keinen Teppichboden hat, kann auf jeden Fall folgenden Versuch durchführen: Ein Kunststofflineal wird mit einem trockenen Baumwolltuch gerieben und dann rasch über den senkrechten Draht bewegt, so als wolle man mit dem Bogen einer Geige über eine Saite streichen. Wiederum flackert die Leuchtdiode verdächtig! Sind hier Zauberkräfte am Werk?

Die auf unseren „Feldfühler“ aus Kupferdraht übergesprungenen Elektronen üben auf die im Kupfer bereits vorhandenen Elektronen eine abstoßende Kraft aus und verschieben sie dadurch ein wenig. Wenn man solche Kräfte als Hokuspokus ansieht (der Fachmann nennt sie „Feldkräfte“), so darf man die Frage getrost mit ja beantworten. Aufgeklärte Zeitgenossen indessen werden die Tatsache, daß es eine elektronenschiebende Kraft gibt, ganz nüchtern als physikalisches Gesetz einordnen und erkennen, daß eine Verschiebung von Elektronen nichts weiter als ein elektrischer Strom ist (den wir in unserem Experiment durch zwei Transistoren gewaltig verstärkt haben).

5.5 Elektronische Polarexpedition

Wo sich Plus- und Minuspol einer Stromquelle befinden, ist nicht immer so einfach festzustellen wie z.B. bei den von uns normalerweise verwendeten Taschenlampenbatterien. Wir bauen deshalb auf der zweiten Aufbauplatte, die wir zur Verfügung haben, einen Universal-Polprüfer auf.

Das Aufbauschema eines derartigen Polprüfers zeigt Bild 24.

Der Polprüfer besteht aus den beiden Leuchtdioden und einem 470-Ω-Schutzwiderstand. An den Punkten A und E kann eine Batterie beliebig angeschlossen werden (bis maximal 12 Volt!). Wenn die Leuchtdiode 1 leuchtet, liegt an A der Minuspol, leuchtet die Leuchtdiode 2, befindet sich der Minuspol bei E.

Die Spürnasen des Polprüfers sind die Leuchtdioden. Sie leuchten auf, wenn sie vom Strom durchflossen werden. Ihr Geheimnis ist, daß sie im Gegensatz zu einem Glühlämpchen den Strom nur in einer Richtung passieren lassen. In unserem Aufbau sind zwei Leuchtdioden gegensinnig (antiparallel) geschaltet. Dadurch wird also immer eine vom Strom durchflossen und leuchtet daher auf. Selbstverständlich läßt sich mit dem Polprüfer auch die Polung der Batterie, die wir für unsere Experimente benutzen, überprüfen. Aufbaubild 25 zeigt die nötigen Verbindungen, 26 den zugehörigen Schaltplan.

Leuchtdioden sind Halbleiter-Bauelemente. Sie sind wesentlich robuster als herkömmliche Lämpchen und haben eine sehr lange Lebensdauer. Durch Verwendung bestimmter Materialien lassen sich rote, gelbe, grüne, orange und neuerdings auch blaue Leuchtfarben erzielen.

Bild 24. Schema eines Polprüfers

Bild 26. Schaltung des Polprüfers

Bild 25. Aufbau zu Schaltung 26

Bild 27. Die Stromstärke gibt an, wieviel Elektronen pro Zeiteinheit einen Querschnitt passieren.

6. Der elektrische Strom

6.1 Wieviele Elektronen fließen

Die Stromstärke *I* sagt aus, wieviele Elektronen innerhalb einer Zeitspanne an einer bestimmen Stelle eines Leitungssystems vorbeifließen.
Bild 27 soll uns helfen, diese Tatsache etwas genauer zu erfassen.
Es zeigt ein Stück Draht, um das außen bei A ein Markierungsring angebracht ist. Er umschließt den an dieser Stelle schraffiert eingezeichneten Querschnitt.

Die Stromstärke von einem Ampere (1A) fließt, wenn je Sekunde 6,25 Trillionen, das sind 6 250 000 000 000 000 000 oder $6{,}25 \times 10^{18}$ Elektronen, durch einen Querschnitt wandern. Die Maßeinheit Ampere (A) ist nach dem französischen Physiker André Marie Ampère (1775 – 1836) benannt.
Für die Stromstärke kommt es also nicht darauf an, wie rasch die Elektronen wandern (der Fachmann sagt „driften") sondern welche Anzahl von Elektronen innerhalb einer bestimmten Zeit befördert werden.
Vergleichen wir die Elektronen mit Wanderern, die in Viererreihen gemächlich auf einem Weg marschieren (Bild 28).
Sie treffen auf eine Brücke, die so schmal ist, daß immer nur ein Mann Platz hat. Die Wanderer

Bild 28. Die „Stromstärke" ist vor, auf und hinter der Brücke gleichgroß.

müssen einzeln hintereinander laufen und die Brücke im Dauerlauf passieren, wenn es alle in derselben Zeit schaffen wollen. Die „Stromstärke“ vor, auf und hinter der Brücke ist gleichgroß, die „Driftgeschwindigkeit“ auf der engen Brücke ist viermal so hoch! Den verschieden großen Wegbreiten entsprechen die unterschiedlichen Querschnitte verschieden dicker Drähte. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen hängt davon ab, wieviele Elektronen gleichzeitig nebeneinander durch den Leiterquerschnitt fließen können. Bei halbem Querschnitt kann bloß die Hälfte nebeneinander herfließen, und die Driftgeschwindigkeit muß für dieselbe Stromstärke doppelt so groß sein. Dazu ist natürlich mehr „Druck“ (Spannung) nötig.

Ein Leiter mit geringerem Querschnitt setzt dem elektrischen Strom einen höheren Widerstand entgegen als ein dicker Leiter. Längere Drähte haben einen größeren Widerstand als kürzere Drähte gleichen Durchmessers. Außer Querschnitt und Länge hat auch das Material, aus dem der Leiter besteht, Einfluß auf den Widerstand einer Leitung. Silber leitet beispielsweise besser als Kupfer, Kupfer besser als Aluminium. Diese Materialeigenschaft bezeichnet man als spezifischen Widerstand (Art-Widerstand).

Den Zusammenhang zwischen Leiterquerschnitt, Leiterlänge und Widerstand zeigt Bild 29 an einem Beispiel. Der Draht a hat denselben Widerstand wie zwei parallel geschaltete Drähte b mit gleicher Länge, aber halbem Querschnitt. Denselben Widerstandswert hat Draht c, der zwar nur den halben Querschnitt von Draht a hat, dafür aber auch nur halb so lang ist. Die spezifischen Widerstände für gebräuchliche Materialien sind in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

Bild 29. Anordnungen gleichen Widerstandes

Tabelle 1: Spezifische Widerstände

Material	ρ_{20}
Silber	0,0163
Kupfer	0,0175
Aluminium	0,0294
Zink	0,0625
Eisen ca.	0,13
CuNi 44	0,49

Das Symbol für den spezifischen Widerstand ist der griechische Buchstabe Rho (ρ). Da der spezifische Widerstand temperaturabhängig ist, wird ein Index eingefügt, der angibt, bei welchen Temperaturen er gemessen wurde. Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für 20° C.

Den Zusammenhang zwischen spezifischem Widerstand, Leiterlänge und Leiterquerschnitt kann man in einer Formel zusammenfassen:

(F3)

$$\text{Drahtwiderstand } (\Omega) = \frac{\text{Spez. Widerstand } (\Omega \text{ mm}^2/\text{m}) \cdot \text{Länge (m)}}{\text{Querschnitt (mm}^2)}$$

6.2 Pop-Art auf Widerständen

Aus dem letzten Kapitel geht ganz klar hervor, daß „Widerstand“ eigentlich eine Materialeigenschaft und nicht etwa ein Bauelement ist. Es ist einer gewissen sprachlichen Schlampigkeit der Elektroniker zuzuschreiben, daß sich der Begriff „Widerstand“ für das Bauelement selbst eingebürgert hat, das Widerstandseigenschaften aufweist – gestrenge und penible Physiker sprechen übrigens zur Reinhaltung der Sprache manchmal auch heute noch von „Rheostaten“ (denn so müßten diese Bauelemente eigentlich bezeichnet werden).

Die heute industriell eingesetzten Widerstände sind runde Würstchen mit poppig bunten Farbringen zur Erkennung ihres Ohmwertes. Das Prinzip der Kennzeichnung ist sehr einfach: Jede Farbe entspricht einer bestimmten Zahl. Schwarz = 0, braun = 1, rot = 2, orange = 3, gelb = 4, grün = 5, blau = 6, violett = 7, grau = 8 und weiß = 9. Die Farben werden von links nach rechts gelesen, wobei rechts diejenige Seite ist, auf der sich ein silberner oder goldener Farbring (manchmal auch mit etwas Abstand von den übrigen Ringen ein roter) befindet. Die beiden linken Farbringe entsprechen direkt Zahlenwerten, während der dritte die Anzahl der anzuhängenden Nullen angibt.

Stromstärke ist offensichtlich unabhängig von der Reihenfolge der Bauteile im Stromkreis.
Wenn wir nun beide 470-Ω-Widerstände wieder herausziehen und den einen durch eine Drahtbrücke, den anderen aber durch einen 1-kΩ-Widerstand ersetzen, so wird sich wiederum dieselbe Helligkeit ergeben, da zweimal 470Ω einen Widerstand von 940Ω ergeben. Dieser Betrag unterscheidet sich nicht mehr wesentlich von 1000Ω, dem Wert des 1-kΩ-Widerstandes.

6.4 100-Meter-Lauf, kein Fall für Elektronen!

Wie schnell bewegen sich Elektronen tatsächlich? Wir haben an einen Leiter eine bestimmte Spannung gelegt, die eine Stromstärke bewirkt, sagen wir 10 Elektronen pro Sekunde. Sind im Leiter sehr viele bewegliche Elektronen für den Stromfluß verfügbar, z.B. 10.000, dann genügt dem einzelnen Elektron eine geringe Geschwindigkeit, damit 10 Elektronen pro Sekunde vorrükken können. Sind dagegen weniger Elektronen frei beweglich (ist also der Widerstand des Leiters größer), dann müssen die einzelnen Elektronen sich schon ein bißchen sputen, um den geforderten Stromfluß herzustellen. Für diesen Zusammenhang haben die Physiker eine Formel entwickelt.

(F5)

Geschwindigkeit der Elektronen ist gleich:

$$\frac{\text{Stromstärke} \cdot \text{Länge des Leiters}}{\text{Anzahl der beweglichen Elektronen im Leiter}}$$

Beispiel: Wir benutzen diese Formel für eine Stromstärke von einem Ampere (1A) = 6,25 x 10^{18} Elektronen pro Sekunde. In einem Kupferdraht von 60,4 mm Länge und 0,5 mm Durchmesser sind 10^{21} (eine Trilliarde) freie Elektronen vorhanden (die krummen Werte wurden nur verwendet, um eine glatte Elektronenanzahl zu erreichen). Dann läßt sich berechnen:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{(6{,}25 \cdot 10^{18}) \cdot 60{,}4}{10^{21}} = 0{,}378 \text{ m/s.}$$

Es ist also erstaunlich, mit welch geringen Geschwindigkeiten sich die Elektronen im Leiter fortbewegen!

6.5 Driftgeschwindigkeit und Laufzeit

Wenn man im Treppenhaus den Lichtschalter drückt, gehen gleichzeitig alle Lampen an.
Ist das bei der winzigen Driftgeschwindigkeit der Elektronen, die wir gerade an einem Beispiel berechnet haben, nicht erstaunlich?

Hier gilt es jedoch, zwei verschiedene Erscheinungen zu berücksichtigen, die wir auf keinen Fall verwechseln dürfen. Das eine ist die Driftgeschwindigkeit der Elektronen, das andere ist die Laufzeit des Einschaltimpulses.
Es ist wie bei der Eisenbahn: Ein Zug ist am Kopfbahnhof angekommen, und die Reisenden sind ausgestiegen. Die Lokomotive steht am Prellbock, der letzte Wagen unter der Halleneinfahrt. Der Lokomotiv-Führer wartet, bis er den Zug aus der Halle auf das Abstellgleis drücken soll.
Wenn der Zug nun langsam rückwärts aus der Halle geschoben wird, fährt die Lokomotive an und fast gleichzeitig auch alle Wagen (Bild 34). Die kurze Zeit, die vom Anfahren der Lokomotive bis zu dem Augenblick vergeht, in dem alle Puffer zwischen den Wagen zusammengedrückt sind und auch der unter der Halleneinfahrt stehende Wagen zu rollen beginnt, ist die Laufzeit des Anfahrimpulses. Der Zug fährt jetzt (der Strom fließt), während die Lokomotive noch eine ganze Zeit braucht, bis sie die Hallenausfahrt

Bild 34. (von links nach rechts:) Der Strom wird eingeschaltet; der Einschaltimpuls pflanzt sich rasch fort; der Strom fließt nun; das Elektron aus dem Schalter hat die Lampe erreicht (siehe Text).

Bild 35. An jeder Stell der Strecke kommen pro Zeiteinheit gleich viele Wagen vorbei.

erreicht hat. Damit die Treppenhauslampen leuchten, müssen also nicht diejenigen Elektronen, die zum Zeitpunkt des Einschaltens im Schalter waren, bis zur obersten Lampe gekommen sein.

Im geschlossenen Stromkreis ist die Stromstärke überall gleichgroß. An jeder Stelle des Stromkreises kommen in jeder Sekunde gleichviele Elektronen vorbei. Wenn wir uns einen Schienenkreis mit einem Eisenbahnzug vorstellen, der so lang ist, daß die Lokomotive den letzten Wagen vor sich herschiebt, ist ja auch ganz klar, daß an jeder Stelle der Strecke in jeder Sekunde gleichviele Wagen vorbeikommen (Bild 35).

Auch wenn der Stromkreis verschiedene Widerstände enthält, ist die Stromstärke an allen Stellen gleich. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen kann dagegen in verschiedenen Teilen des Stromkreises unterschiedlich sein; sie hängt vom Querschnitt und von den verfügbaren freien Elektronen ab.

7. Das Ohmsche Gesetz

Der deutsche Physiker Georg Simon Ohm (1789 – 1854) war Zeit seines Lebens dafür bekannt, daß er Ungenauigkeiten haßte. Ausgerechnet ihm widerfuhr, daß die Nachwelt Unordnung in die Überlieferung seiner Lebensdaten brachte. Durch die Ähnlichkeit der Zahl 9 in Kanzleischrift mit der Zahl 7 späterer Handschriften wurde sein Geburtsjahr oft falsch wiedergegeben, und es kam sogar zu einer um zwei Jahre verfrühten Feier seines 150. Geburtstags. In manchen Nachschlagewerken taucht der Fehler heute noch auf.

Ohm hat als Erster die Abhängigkeiten zwischen Spannung, Widerstand und Strom im Stromkreis erkannt und diese Zusammenhänge im Jahre 1827 als Gesetz bekanntgemacht – dem dann nach ihm benannten Ohmschen Gesetz.

7.1 Wie hoch ist die Stromstärke?

Wir bauen die Schaltung nach Abbildung 36 auf und drehen mit dem Drehknopf P1 das Potentiometer hin und her (Schaltbild 37). Wir beobachten dabei, daß sich die Helligkeit der Leuchtdiode mit der Potieinstellung deutlich verändert. Durch Verstellen der Potis haben wir einen mehr oder weniger großen Teil seiner Kohlebahn in den Stromkreis geschaltet und damit den Gesamtwiderstand des Stromkreises laufend verändert.

Daß sich durch Änderung des Widerstandes

Bild 37. Potentiometer im Stromkreis

Bild 36. Aufbau zu Schaltung 37

stets auch die Stromstärke ändert, stellt eine der drei Aussagen des Ohmschen Gesetzes dar:
Bei gleichbleibender Spannung hängt die Stärke des fließenden Stromes vom Widerstand ab, den ihm der Stromkreis entgegensetzt.
Wir können diesen Zusammenhang in eine Formel kleiden, mit Hilfe derer sich die Stromstärke berechnen läßt, wenn Spannung und Widerstand bekannt sind:
Stromstärke = Spannung/Widerstand
Der Fachmann schreibt Formeln nicht in Wörtern, sondern mit Buchstabensymbolen, die international genormt sind. Für den Widerstand steht der Buchstabe *R*, für Stromstärke *I* und für Spannung *U*.
Hier taucht die Frage auf, weshalb nicht für den Widerstand Ω, für den Strom A und für die Spannung V als Symbol verwendet werden.
Die Antwort ist einfach: wir müssen zwischen physikalischen Grundgrößen und Maßeinheiten unterscheiden. So ist z.B. die Zeit eine physikalische Größe, die man mit *t* abkürzt. Für sie gibt es verschiedene Maßeinheiten, wie die Sekunde s und die Stunde h, die Minute min und den Tag d.
Nach den Normen DIN 1338 und 1304 werden Abkürzungen physikalischer Größen schrägstehend (kursiv) und Abkürzungen für Maßeinheiten geradestehend (Normalschrift) geschrieben. Das erlaubt, den Sinn von Buchstaben in Berechnungen auf den ersten Blick zu erkennen. Tabelle 2 gibt uns eine Zusammenstellung der Buchstabensymbole, die wir bereits kennengelernt haben und weiter benutzen werden.

Tabelle 2: Maßeinheiten physikalischer Größen

Physikalische Größe	Symbol	Maßeinheit	Symbol
Zeit	*t*	Sekunde	s
Frequenz	*f*	Hertz	Hz
Spannung	*U*	Volt	V
Stromstärke	*I*	Ampere	A
Widerstand	*R*	Ohm	Ω

Den eben geschilderten Zusammenhang des Ohmschen Gesetzes können wir demnach als Formel so aufschreiben:

(F6) $I = \frac{U}{R}$

Beispiel: Setzen wir für *U* = 9V und für *R* = 100.000Ω (100kΩ) ein, so erhalten wir:
I = 9V : 100.000Ω = 0,00009A
oder
I = 0,09mA bzw. 90μA
Die Vorsätze „Milli" (m) bzw. „Micro" (μ) erlauben eine übersichtliche Schreibweise. Die Tabelle 3 gibt eine Zusammenstellung der genormten Vorsätze nach DIN 1301, die wir verwenden werden.

Tabelle 3: Benennung von Zehnerpotenzen

Faktor	Zehnerpotenz	Vorsatz	Vorsatzzeichen
Mal 1 000 000 (Million)	10^{6}	Mega	M
Mal 1 000 (Tausend)	10^{3}	Kilo	k
Mal 0,001 (Tausendstel)	10^{-3}	Milli	m
Mal 0,000 001 (Millionstel)	10^{-6}	Mikro	μ
Mal 0,000 000 001 (Milliardstel)	10^{-9}	Nano	n
Mal 0,000 000 000 001 (Billionstel)	10^{-12}	Piko	p

7.2 Der Widerstand läßt sich auch berechnen

Wenn in einem Stromkreis die Stromstärke sowie die Batteriespannung bekannt sind, läßt sich auch der Gesamtwiderstand des Stromkreises ermitteln. Dazu müssen wir die Formel F6 folgendermaßen umstellen:

(F7) $R = \frac{U}{I}$

Dies ist die zweite Aussage des Ohmschen Gesetzes.
Beispiel: An einem Stromkreis mit einem unbekannten Widerstand *Rx* und einer Leuchtdiode liegt eine Batteriespannung von 9V. Der Strom

im Kreis wird zu 15,7mA ausgemessen (z.B. mit dem Meßinstrument aus KOSMOS electronic X 4000). Subtrahiert man von den 9V die stets an einer Leuchtdiode liegenden 1,6V, so erhält man die an dem unbekannten Widerstand liegende Spannung von 7,4V. Damit kann der Widerstand berechnet werden:

$$R_x = 7{,}4\,V : 15{,}7\,mA = 471\,\Omega$$

Offensichtlich handelt es sich hier um den uns bestens bekannten 470-Ω-Widerstand, dessen Ohmwert natürlich mit einer gewissen Abweichung vom Sollwert (Toleranz) behaftet ist.

7.3 Aller guten Dinge sind drei

Die beiden Formeln F6 und F7 zeigen nicht nur, daß die Stromstärke vom Widerstand des Stromkreises, sondern auch, daß sie von der Höhe der Batteriespannung abhängt.
Wollen wir berechnen, welche Spannung nötig ist, um einen bestimmten Strom durch einen gegebenen Widerstand zu treiben, benutzen wir die Formel F8, die wir durch Umstellen einer der beiden vorhergehenden Formeln erhalten können. Sie stellt die dritte Aussage des Ohmschen Gesetzes dar:

(F8) $$U = I \cdot R$$

Formel F8 eignet sich auch dafür, einen „Spannungsabfall", d.h. eine Spannungsdifferenz zwischen den Anschlüssen eines Widerstandes zu berechnen.
Beispiel: Durch einen 1-kΩ-Widerstand fließt ein Strom von 5mA. An seinen Anschlüssen liegt dann eine Spannung von

$$U = 1\,k\Omega \cdot 5\,mA = 5\,V$$

Es trägt wesentlich zum Verständnis elektrischer Vorgänge bei, wenn wir uns angewöhnen, jedesmal, wenn wir auf das Wort „Spannung" stoßen, dafür in Gedanken das Wort „Spannungsunterschied" oder „Spannungsabfall" einzusetzen und gleichzeitig zu überlegen, zwischen welchen Punkten dieser Spannungsunterschied herrscht. So wie man im Gebirge auch die Höhendifferenz angeben kann, die ein Wanderer vom Tal bis zur Berghütte zu bewältigen hat, kann man in der Elektronik auch einen Spannungsunterschied zwischen zwei beliebigen Punkten angeben.

7.4 Die geteilte Spannung

Erinnern wir uns an Experiment nach Bild 36: Durch Verdrehen des Potis konnten wir die Helligkeit der Leuchtdiode stufenlos einstellen. Aber – vielleicht haben es einige gar nicht registriert – die Leuchtdiode konnte nicht zum vollständigen Verlöschen gebracht werden. Schaut man noch einmal auf Schaltbild 37, so erkennt man auch sofort, warum: Wenn die gesamte Kohleschichtbahn des Potentiometers im Stromkreis liegt, der 10-kΩ-Wert des Potentiometers also voll zum Tragen kommt, ist der Gesamtwiderstand nach Formel F4: 10kΩ + 470Ω = 10,47kΩ.

Bei diesem Widerstand ist der Strom durch die Leuchtdiode noch groß genug, um sie ganz schwach leuchten zu lassen.
In Abbildung 39 liegen die Dinge nun anders; das Potentiometer ist als „Spannungsteiler" geschaltet (Aufbaubild 38).

Bild 38. Aufbau zu Schaltung 38

Bild 39. Potentiometer als Spannungsteiler

Was ein Spannungsteiler ist, verdeutlicht Bild 40. Der tüchtige Mann an der Kurbel kann stufenweise verschiedene Spannungswerte zwischen 0V und +9V (0V ist der Bezugspunkt, die Masse, also Minuspol der Batterie) einstellen. Die „abgegriffene" Spannung steht am Kurbelanschluß zur

Bild 40. Der Spannungsteiler

Verfügung. Die Anzahl der verschiedenen Spannungswerte ist leider durch die Anzahl der in Reihe geschalteten Widerstände begrenzt. Um jede beliebige Spannung zwischen 0V und +9V einstellen zu können, müßte der Mann unendlich viele Widerstände einbauen. Ihm wäre geholfen, wenn er ein Potentiometer nach Abbildung 42 zur Verfügung hätte. Auf der Kohlebahn des Potentiometers können ohne Stufung (kontinuierlich) beliebige Spannungen zwischen 0V und 9V über den Schleifer abgegriffen werden.
Eine Widerstandskette mit zwei oder mehreren Gliedern nach Bild 41 oder ein Potentiometer nach Bild 42 heißt **Spannungsteiler**.
Es wird nun auch klar, daß die Leuchtdiode in Schaltung 39 ganz ausgeht, wenn sich der Schleifer des Potentiometers in Richtung Batterie-Minuspol bewegt: Die abgegriffene Span-

Bild 41. Spannungsteiler aus Festwiderständen

Bild 42. Potentiometer-Spannungsteiler

nung wird immer kleiner, so daß sie ab einem bestimmten Wert nicht mehr genug Kraft aufbringt, um genügend Elektronen durch die Diode zu schicken.

Anmerkung:
Die drei Anschlüsse der Potentiometer haben wir jeweils mit n, s und h bezeichnet. „n“ steht für niedrig; das bedeutet, daß sich der Schleifer „s“ bei **Linksdrehung** des Knopfes auf diesen Anschluß zubewegt. Entsprechend steht „h“ für hoch; das ist der Anschluß, auf den sich der Schleifer bei **Rechtsdrehung** des Knopfes zubewegt.

8. Der Kondensator: ein Elektronenspeicher

Die Blinklichtschaltung auf den ersten Seiten enthält neben den bekannten Bauelementen einen Kondensator.
Wie ist er aufgebaut, und wie funktioniert er?
Der einfachste Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, zwischen denen sich „nichts“ befindet. Die Anführungsstriche deshalb, weil „nichts“ das Vakuum bedeutet, also einen luftleeren Raum (Bild 43). Das Vakuum ist ein idealer Isolator!
Die Kondensatoren unserer Experimentierausrüstung haben zwischen ihren Platten allerdings kein Vakuum, sondern einen Isolierstoff, z.B. Kunststoff-Folie. Man nennt einen Isolierstoff zwischen zwei Kondensatorplatten **Dielektrikum** (Bild 44), sprich Di-Elektrikum.
Das einigermaßen verblüffende Verhalten eines Kondensators zeigt uns der folgende Versuch (Bild 45):
Der 100-µF-Kondensator befindet sich in einem Stromkreis mit der Batterie und dem Lautsprecher (Schaltbild 46). Wird zum Schluß die Draht-

Bild 43. Zwischen den Platten eines idealen Kondensators befindet sich „nichts“ (Vakuum).

Bild 44. Schema eines Wickelkondensators

Metallfolie

Dielektrikum

brücke X eingesteckt, so hört man ein leises, aber deutliches Knacken im Lautsprecher. Es ist offensichtlich kurzzeitig ein Strom geflossen!

Die gestrichelt eingezeichnete Drahtbrücke betrachten wir zunächst nicht.

Die Drahtbrücke wird herausgezogen und gemäß der gestrichelten Linie eingesteckt; der Lautsprecher ist damit direkt an den Kondensator angeschlossen. Wiederum ist das leise Knackgeräusch deutlich wahrnehmbar.

Experimentieranregung: Statt des 100 µF-Kondensators können auch die anderes Kondensatoren ausprobiert werden.

Daß trotz des Isolators zwischen den Kondensatorplätten kurzzeitig ein Strom geflossen ist, scheint alles bisher Dagewesene auf den Kopf zu stellen, denn durch den Isolator (oder durch das Vakuum) wird doch der Stromkreis unterbrochen!

Das Geheimnis eines Kondensators liegt in der „Fernwirkung“ von elektrischen Ladungen; diese Beeinflussung auf Distanz soll nun etwas genauer beleuchtet werden.

Bild 45. Aufbau zu Schaltung 46

Bild 46. Durch den Kondensator fließt kurzzeitig ein Strom!

8.1 Wirkung aus der Ferne

Was machen zwei Elektronen, die wir in Gedanken an zwei Fäden im luftleeren Raum aufhängen?

Sie üben eine Kraft aufeinander aus, und da sie die gleiche (negative) Ladung tragen, stoßen sie sich ab. Umgekehrt würden sich zwei entgegengesetzt gepolte Ladungen anziehen.

Kräfte dieser Art, man nennt sie elektrische

Bild 47. So etwa kann man sich die Fernwirkung der elektrischen Feldkräfte vorstellen.

Feldkräfte, sind auch für das Funktionieren unseres Kondensators als Elektronenspeicher verantwortlich.
Wenn wir zwei Metallplatten in einem Abstand anordnen und auf einer der Platten außen eine Anzahl Elektronen aufbringen, so üben diese Elektronen auf ihre gleichgepolten Artgenossen, die auf der anderen Platte von Haus aus vorhanden sind, eine abstoßende Kraft aus (Bild 47). Die zweite Platte verarmt dadurch an Elektronen, wenn wir dafür Sorge tragen, daß die abgestoßenen Elektronen abfließen können. Dies geschieht z.B. dadurch, daß wir die Platten mit einer Batterie, so wie wir es gemäß Bild 45 getan haben, verbinden.

Die Dinge liegen nun so: Aus der Batterie wurden vom Minuspol etliche Elektronen auf eine Platte befördert. Die auf der gegenüberliegenden Platte abgestoßenen Elektronen fließen zum elektronenarmen Pluspol der Batterie; von dort werden sie wegen der entgegengesetzten Polarität ja angezogen.
Wenn in diesem Zustand die Leitungen zur Batterie unterbrochen werden, so bleibt der Ladezustand des Kondensators erhalten: auf der einen Platte befinden sich zusätzliche Elektronen, von der anderen ist die entsprechende Anzahl in der Batterie verschwunden. Der Kondensator ist geladen, er ist selbst zur Batterie geworden mit einem elektronenreichen Minuspol und einem elektronenarmen Pluspol. Der Kondensator hat Ladung gespeichert.
Werden die beiden Platten (z.B. über den Lautsprecher) miteinander verbunden, so findet ein Ladungsausgleich statt, der Kondensator entlädt sich und wird wieder neutral.
Was passiert, wenn der Raum zwischen den beiden Kondensatorplatten mit einem Isolierstoff ausgefüllt wird?
Der Kondensator kann mehr Ladung speichern, weil die Kraftwirkung nicht mehr über die volle Distanz von Platte zu Platte erfolgt, sondern von Isolatoratom zu Isolatoratom weitergegeben wird.
Wie ist diese Weitergabe vorstellbar?
Durch die elektrischen Feldkräfte werden die Atome des Isolators deformiert, d.h. ihre Elektronenhüllen werden von der mit zusätzlichen Ladungen besetzten Kondensatorplatte abgestoßen. Der Atomkern sitzt nun nicht mehr im Zentrum der Elektronenhülle. Ein dergestalt deformiertes Atom heißt elektrischer **Dipol**.

Die Fähigkeit eines Kondensators, Elektronen zu speichern, nennt man **Kapazität**. Sie wird mit dem Buchstaben **C** abgekürzt und in Farad F (nach dem englischen Physiker Faraday 1791 – 1867) bzw. Millionstel Teilen (µF = Mikrofarad), Milliardstel Teilen (nF = Nanofarad) oder sogar in Billionstel Teilen (pF = Picofarad) eines Farads angegeben.
Wovon hängt das Fassungsvermögen eines Kondensators ab?

a) Von der Größe der Kondensatorfläche (die Dicke der Kondensatorplatte spielt keine Rolle, da die kraftausübenden Elektronen nur auf der Oberfläche sitzen).
b) Vom Abstand der Kondensatorplatten.
c) Vom Stoff, der sich zwischen den Platten befindet, also vom Dielektrikum.

Kleidet man diese drei Bedingungen in eine Formel, dann ergibt sich:

(F9) $$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$$

Die Dielektrizitätskonstante ε (griechischer Kleinbuchstabe Epsilon) gibt an, um wieviel die Kapazität des Kondensators durch das Einbringen eines Isolierstoffes zwischen die Platten gegenüber dem Kondensator im Vakuum vergrößert wurde. ε wird daher in zwei Teile aufgespalten:

(F10) $$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r$$

ε_o = Dielektrizitätskonstante im Vakuum (absolute Dielektrizitätskonstante)
= 0,08859 · 10^{-12} As/ Vcm
ε_r = Dielektrizitätskonstante eines Stoffes (relative Dielektrizitätskonstante)

εr einer Reihe von Stoffen gibt die folgende Tabelle an.

Tabelle 4: Relative Dielektrizitätskonstanten verschiedener Stoffe

Material	εr
Hartpapier	3,5 . . . 4
Preßspan	2,5
Porzellan	5,4 . . . 6,4
Glas	3,4 . . . 6
Glimmer	5 . . . 8
Luft	1,0006

Nach Formel 9 steigt die Kapazität eines Kondensators an, wenn seine Fläche größer wird. Eine Vergrößerung der Plattenfläche kann auch durch Parallelschalten von Kondensatoren erreicht werden.

(F11) Parallelschaltung: $C_{ges} = C_1 + C_2$

Schaltet man Kondensatoren in Serie, so gilt:

(F12) Serienschaltung: $\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots$

8.2 Gebremster Spannungsanstieg

Neben den merkwürdigen Eigenschaften des Kondensators, die wir im letzten Kapitel kennengelernt haben, gibt es noch eine seltsame Erscheinung, die auftritt, wenn Kondensatoren und Widerstände zusammenwirken.

Bild 48. Aufbau zu Schaltung 49

Eine Versuchsanordnung zeigt Abbildung 48, Bild 49 ist das dazugehörige Schaltbild. Untersucht wird das Verhalten des Elektrolyt-Kondensators (Elko) 470µF im Zusammenspiel mit dem 470-Ω-Widerstand *R*1.
Wird der Taster gedrückt, so erreicht die Leuchtdiode erst mit einer gewissen Verzögerung ihre volle Helligkeit. Läßt man den Taster wieder los (schaltet also die Batterie ab), so geht die Leuchtdiode nicht schlagartig aus, sondern erlischt erst nach einer gewissen Zeit.
Das Zusammenspiel des 470-µF-Kondensators mit dem Widerstand *R*1 bewirkt also offensichtlich sowohl beim Laden als auch beim Entladen eine Verzögerung.

Es können verschiedene Kondensatorwerte und Werte für *R*1 probiert werden.

Bild 49. Verzögerungen durch Kondensator und Widerstand

Bild 50. Ladekurve eines Kondensators

Bild 51. Entladekurve eines Kondensators

Eine graphische Darstellung von Lade- und Entladevorgang zeigen die Abbildungen 50 und 51.
Man sieht, daß die Gesamtlade- bzw. Entladezeit in 5 Zeitabschnitte zerlegt ist. Der Zeitabschnitt τ (griechischer Kleinbuchstabe Tau) heißt Zeitkonstante, und berechnet sich zu

(F13) $\tau = R \cdot C$

τ ist unabhängig von der Batteriespannung und gibt die Zeit an, in der beim Ladevorgang die Kondensatorspannung 63,2 % der Batteriespannung erreicht; beim Entladevorgang diejenige Zeit, nach der die Spannung am Kondensator auf 36,8% ihres ursprünglichen Wertes abgesunken ist.

9. Vom Halbleiterkristall zum Transistor

9.1 Leitfähigkeit besonderer Art

Alle Metalle leiten den elektrischen Strom, das wurde bereits gesagt. Wichtig ist für uns zu wissen, daß ihre Leitfähigkeit mit steigender Temperatur sinkt.
Manche Stoffe zeigen jedoch ein ganz merkwürdiges Verhalten: Sie sind bei Zimmertemperatur Isolatoren, leiten aber bei Erwärmung den elektrischen Strom. Im Gegensatz zu den Metallen wird also ihre Leitfähigkeit mit steigender Temperatur größer. Stoffe mit dieser Eigenschaft nennt man **Halbleiter**, zu ihnen gehören z.B. die Elemente Silizium und Germanium.
Wie kommt es zu diesem merkwürdigen Verhalten?
Betrachten wir stellvertretend das Element Silizium. Ein Silizium-Kristall besteht aus regelmäßig angeordneten Siliziumatomen (Kristallgitter!). Jedes Siliziumatom besitzt vier Elektronen auf der Außenschale der Elektronenhülle. Im Gitter ist jedes Atom mit vier Nachbaratomen verbunden, wobei die vier Außenelektronen für die Bindung sorgen, indem sie wechselseitig einmal das eine, dann das Nachbaratom umkreisen.
Durch dieses Wechselspiel kommt eine starke Bindung zustande. Um diesen Vorgang zu veranschaulichen, stellen wir uns zwei Kinder vor, die sich zwei Bälle wechselseitig zuwerfen. Zusammen besitzen die Kinder ein gemeinsames Ballpaar, das im Spiel die Verbindung zwischen ihnen herstellt.

Bild 52. Jedes SiAtom geht vier Elektronenpaarbingungen mit Nachbaratomen ein.

Jedes Siliziumatom geht vier solcher Elektronen-Paarbindungen ein (Bild 52). Der Unterschied zu den Metallen besteht darin, daß beim Halbleiter die Elektronen der Außenschale durch die starken Bindungen nicht ohne weiteres wandern können. Bei Zimmertemperatur fließt kaum ein Strom durch das Siliziumkristall.
Bei Zufuhr von Energie, z.B. Wärme, werden einige Elektronen aus ihren Bindungen herausgerissen. Sie stehen als „freie" Elektronen zur Verfügung und hinterlassen einen freien Platz, man spricht von einem „Loch", der von einem anderen Elektron eingenommen werden kann.

9.2 Ein Loch geht auf die Reise

Wird an einen erwärmten Kristall von außen eine elektrische Spannung angelegt, so fließt ein Strom. Der Leitungsvorgang läßt sich an folgendem Bild veranschaulichen (Bild 53).
Eine Reihe von 6 Männchen befördert runde Platten von links nach rechts. Die Stelle, an der sich keine Platte befindet, wandert jedoch in entgegengesetzter Richtung.

Bild 53. Die Plättchen werden von links nach rechts befördert; das Loch wandert von rechts nach links.

Ein ähnlicher Vorgang spielt sich bei der Stromleitung im Halbleiterkristall ab. Mit der tatsächlichen Elektronenwanderung vom Minus- zum Pluspol ist eine scheinbare „Loch"-Wanderung vom Plus- zum Minuspol verbunden. Dies alles funktioniert, wie gesagt, jedoch nur bei erhöhter Temperatur.

9.3 Störungen erwünscht

Um einen Halbleiter bei Zimmertemperatur verwenden zu können, muß man ohne Energiezufuhr entweder die Zahl der beweglichen Elektronen oder aber die Zahl der „Löcher" erhöhen. Man erreicht dies durch den Einbau von Atomen anderer Elemente in das Kristallgitter des Siliziums oder Germaniums. Der Einbau von Fremdatomen mit fünf Elektronen auf der äußeren Schale erhöht die Anzahl der zur Verfügung stehenden Elektronen, der Einbau von Fremdatomen mit nur drei Atomen auf der äußeren Schale schafft zusätzlich Plätze für Elektronen, also Löcher (Bild 54).

freies Elektron ohne feste Bindung

„Loch" d.h. freier Elektronenplatz

Bild 54. Einbau von unterschiedlichen Störatomen in ein Silizium-Kristallgitter (oben Phosphor, unten Aluminium).

Den Vorgang des Einbaus von Fremdatomen (man sagt auch Störstellen) nennt man **Dotieren**.

Hat man die Anzahl der verfügbaren Elektronen erhöht, so spricht man von **n-Material**, sind durch Dotieren freie Elektronenplätze („Löcher") entstanden, so spricht man von **p-Material**.

Anmerkung:

Verfügbarkeit von Elektronen bzw. Löchern bedeutet nicht, daß der Kristall nach außen elektrisch geladen ist. Diese Feststellung ist für die folgenden Betrachtungen besonders wichtig.

9.4 Diode und pn-Übergang: Einbahnstraße für Elektronen

Ein Gebilde aus einem n-leitenden und p-leitenden Material heißt Diode, sie läßt den Elektronenfluß nur in einer Richtung passieren.

Das Prinzip von Durchlaß- und Sperr-Richtung zeigt Bild 55 und 56. Was im Innern einer Diode tatsächlich vor sich geht, soll im folgenden Abschnitt ohne mathematischen Ballast anschaulich gemacht werden (Bildfolge 57).

Bild 55. „Wasserdiode" (gesperrter Zustand)

Bild 56. „Wasserdiode" (leitender Zustand)

Bildfolge 57: Die Vorgänge im Inneren einer Diode

n-Material enthält frei verfügbare Elektronen. p-Material besitzt Plätze für Elektronen („Löcher").

n- und p-Material werden zusammengefügt. Elektronen an der Grenzschicht des n-Materials wandern in das benachbarte p-Material. Dieser Vorgang heißt Diffusion.

Die Diffusion hat zwei wichtige Dinge zur Folge:
1. Die aus dem n-Material abgewanderten Elektronen besetzen „Löcher" des p-Materials; dadurch verarmen die Grenzzonen an beweglichen Ladungsträgern.

2. Das n-Material hat Elektronen abgegeben. Es wird dadurch positiv geladen. Das p-Material hat Elektronen aufgenommen; es wird dadurch negativ geladen.

Von außen wird eine Spannung angelegt, die der inneren Spannung gleichgerichtet ist. (Pluspol an das n- und Minuspol an das p-Material.)

Die Verarmungszone vergrößert sich, es fließt kein Strom. Die Diode sperrt.

Die äußere Spannung wird umgepolt, so daß sie der inneren Spannung entgegengerichtet ist. In der Verarmungszone wandern von außen Ladungsträger ein, es kommt ein Stromfluß in Gang. Die Diode leitet.

9.5 Dioden auf dem Prüfstand

Am Prüfvorgang nehmen teil: die Germaniumdiode, die Siliziumdiode, die LEDs und die Infrarotdiode. Als Testgerät dient uns wieder der aus Kapitel 3.3 bekannte Durchgangsprüfer.
Wenn wir wissen wollen, welches Diodenbein mit dem n-leitenden Material verbunden ist (man nennt diesen Anschluß die **Katode**), so kann uns unser Prüfgerät sofort Auskunft geben. Die zu prüfende Diode wird beliebig an die von x und y kommenden Drähte gehalten; gibt der Durchgangsprüfer einen Ton ab, so ist die Diode in Durchlaßrichtung gepolt, d. h. die Katode (= n-Material) befindet sich dann bei y. Entsprechend gilt, daß sich die Katode bei x befindet, wenn die Diode sperrt, also kein Strom fließt und der Durchgangsprüfer stumm bleibt.

Bild 59. Einfache Sensor-Taste

Bild 58. Aufbau zu Schaltung 59

9.6 Der Transistor: ein Verstärkerelement

Der Transistor eignet sich hervorragend dazu, kleine Ströme zu verstärken. Das Prinzip ist sehr einfach: Man schickt einen kleinen Strom in den Transistor hinein und bringt damit einen wesentlich größeren Strom zum Fließen, mit dem man z.B. eine Leuchtdiode betreiben kann. Das Verhältnis von Ausgangstrom zu Eingangsstrom nennt man **Stromverstärkung**.
Stromverstärkung = Ausgangsstrom/Eingangsstrom oder anders ausgedrückt:

(F14) $B = \frac{I_C}{I_B}$

Die Stromverstärkung eines Transistors wird mit dem Buchstaben B bezeichnet. Eine sehr einfache Anwendung des Prinzips zeigt Bild 58:
An der Stelle z ist die Leitung unterbrochen (Schaltbild 59). Wenn wir die Unterbrechung mit einem feuchten Finger überbrücken, so fließt durch den Finger ein äußerst schwacher und ungefährlicher Strom von etwa 100µA in den Transistor hinein. Der Transistor verstärkt diesen winzigen Strom kräftig. Der Ausgangsstrom reicht aus, die Leuchtdiode zum Leuchten zu bringen.
Den Anschluß B nennt man **Basis**. Den Anschluß C **Kollektor** und den Anschluß E **Emitter**.
Was wir mit dem Berührungsschalter sozusagen am eigenen Leibe erfahren haben, läßt sich durch die folgende Darstellung sehr gut erklären.
Auf Bild 61 sehen wir, wie im Gegensatz zu Bild 60 über den Basisbach B ein kleiner Wasserstrom fließt, der eine kleine Klappe etwas anhebt, bevor er sich in das Emitter-Bett ergießt. Diese Klappe ist mit dem Schleusentor verbunden. Je weiter die Klappe angehoben wird, desto mehr wird das Schleusentor geöffnet. Durch das Schleusentor fließt ein von C kommender Kollektorstrom in das Emitterbett E, der ein Vielfaches

Bild 60. „Wasser-Transistor" (gesperrter Zustand)

Bild 61. „Wasser-Transistor" (leitender Zustand)

der Wassermenge des von B kommenden Basisbaches führt. Der schwache Basisstrom steuert durch diese Schleuseneinrichtung die Stärke des Kollektorstromes. Der bei E aus dem Emitterbett herausfließende Strom ist die Summe aus dem starken Kollektorstrom und dem schwachen Basisstrom.
Wie die Diode so ist auch der Transistor ein Halbleiterbauelement. Im Gegensatz zur Diode besteht er jedoch aus drei Schichten, die z.B. in der Reihenfolge n-p-n angeordnet sein können. Jede dieser Schichten hat einen Anschlußpunkt. Der Basisanschluß ist zur mittleren Schicht geführt, Kollektor und Emitter liegen außen.
Die Leitungsvorgänge im Innern des Transistors veranschaulicht schematisch die nachstehende Bildfolge 62.
Im Unterschied zum Wasserschleusenmodell wird dabei die reale Elektronenwanderung und nicht die technische Stromrichtung dargestellt. (Die hier zum besseren Verständnis gezeigte „Scheibchenanordnung" der verschiedenen Schichten findet in der Praxis keine Anwendung. Je nach Art der technisch z.T. hochkomplizierten Herstellungsverfahren unterscheidet man Legierungstransistoren, Diffusionstransistoren, Drifttransistoren und Planartransistoren).
Technisch wird auch die Schichtenfolge p-n-p verwirklicht. Alle Erklärungen gelten sinngemäß auch für den pnp-Transistor, es muß lediglich die Polarität aller Spannungen umgedreht werden.

Bildfolge 62: Die Vorgänge im Inneren eines Transistors

Die Schichten werden aneinandergefügt. Es setzt Diffusion ein.

Es entstehen Verarmungszonen, die weit in die Basis hineinreichen.

Die n-Grenzschichten werden positiv, die p-Grenzschichten negativ geladen (siehe Diode).

An die drei Anschlüsse werden Spannungen so angelegt, daß sie den inneren Spannungen entgegengerichtet sind. Die Verarmungszonen Emitter/Basis werden abgebaut, da sie mit Ladungsträgern überschwemmt werden.

Die p-Schicht der Basis ist sehr dünn: Deshalb gelangen auch Elektronen in die Kollektor-Verarmungszone. Der starke Kollektorstrom kommt in Gang.

10. Transistor-Praxis

10.1 Ein Transistor-Prüfgerät

Etwas vereinfacht kann man einen Transistor als zwei gegeneinander geschaltete Dioden auffassen, so wie es Abbildung 63 zeigt.

Bild 63. Basis-Emitter- und Basis-Kollektordiode im Transistor

Wenn Zweifel bestehen, ob ein Transistor nicht eventuell aus irgendwelchen Gründen seinen Geist aufgegeben hat, so kann man auf sehr einfache Weise zunächst einmal seine „Dioden" einzeln durchmessen.

Bild 64 bis 69. Ausmessen der Dioden im Transistor

Die Prüfungen nach Bild 64 und 65 müssen Durchgang ergeben (Durchgangsprüfer gibt Ton ab), bei umgekehrter Polung nach Bild 66 und 67 müssen die Dioden „sperren" (kein Ton). Sicherheitshalber vergewissert man sich zum Schluß auch noch, daß eine Messung über beide gegeneinander geschaltete „Dioden" unabhängig von

der Polarität keinen Durchgang ergibt (Bild 68 und 69).
Wenn alle diese Tests positiv verlaufen sind, kann man sicher sein, daß der Transistor noch in Ordnung ist. Aussagen über den Verstärkungsfaktor oder sonstige Transistordaten gewinnt man dabei allerdings nicht.

10.2 Verdunklungsschaltung

Wir wollen jetzt einmal Schleusenwart spielen und in den Basiskanal von Abbildung 61 sehr dosiert Strom fließen lassen.
Dazu erinnern wir uns an das Potentiometer als Spannungsteiler aus Kapitel 7.4, mit dem man, wie wir gesehen haben, jede Spannung zwischen 0V und + 9V stufenlos einstellen kann.
Die am Schleifer abgegriffene Spannung geben wir (über einen Schutzwiderstand) auf die Basis eines Transistors, in dessen Kollektorkanal eine Leuchtdiode liegt (natürlich auch sie mit einem Schutzwiderstand). Abbildung 70 zeigt das Schaltbild, Abbildung 71 den Aufbauplan.
Bewegt man den Schleifer des Potentiometers von n nach h (Drehknopf von links nach rechts), so glimmt die LED langsam auf und erreicht schließlich ihre volle Helligkeit. Das ist ja auch klar, denn die stetig größer werdende Spannung treibt ja auch einen kontinuierlich anwachsenden Strom in die Basis des Transistors.

Bild 70. Verdunklungsschaltung

10.3 Kollektorfolger (Emitterschaltung)

Für Schaltung 73 (Aufbau 72) wurde ein zweiter Transistor spendiert, und wir werden nun beobachten, wie sich die LED verhält, wenn wir wiederum den Potentiometerschleifer von n nach h bewegen. Wir werden folgende Überlegung bestätigt finden: Befindet sich der Schleifer ganz auf n, so ist T1 gesperrt. Über $R2$ fließt nun so reichlich Strom in die Basis von T2, daß die LED hell leuchtet. Je weiter der Schleifer jetzt nach h verstellt wird, desto leitender wird T1 und beansprucht einen immer größer werdenden Teil des Stromes durch $R2$ für sich – und desto kleiner wird natürlich der für die Basis von T2

Bild 73. Aus hell wird dunkel

Bild 71. Aufbau zu Schaltung 70

Bild 72. Aufbau zu Schaltung 73

verbleibende Reststrom. Die Leuchtdiode wird rasch dunkler und geht schließlich ganz aus.
Man kann es auch so betrachten: Je leitender der Transistor T1 wird, desto mehr bewegt sich die Spannung an seinem Kollektor in Richtung 0V. Folglich wird der Strom, der in die Basis von T2 getrieben wird, immer kleiner, und damit sinkt auch der Kollektorstrom von T2 immer weiter ab.
Wir halten fest: Der zweite Transistor stellt die Dinge sozusagen auf den Kopf. Aus hell wird dunkel, und aus dunkel wird hell. Dies nennt man invertieren. Ein Transistor, dessen Emitter mit der Masse der Schaltung verbunden ist und in dessen Kollektorleitung sich der Arbeitswiderstand befindet, invertiert. Die Schaltungsart heißt Emitterschaltung oder **Kollektorfolger**.

10.4 Emitterfolger (Kollektorschaltung)

Niemand kann einem verbieten, die Leuchtdiode mit ihrem Schutzwiderstand in die Emitterleitung zu legen und den Kollektoranschluß des Transistors direkt mit dem Pluspol der Batterie zu verbinden. Abbildung 75 zeigt eine solche Anordnung; man nennt sie Kollektorschaltung oder auch **Emitterfolger**.
Die Sache funktioniert zunächst genauso, wie wir es von der Emitterschaltung her kennen: Wird der Potischleifer von n nach h bewegt, so nimmt die Helligkeit der Leuchtdiode zu.
Eine Überraschung erleben wir bei Schaltung 76 mit einem nachgeschalteten zweiten Emitterfolger: Es findet keine Invertierung statt, die Schaltung verhält sich scheinbar so, als bestünde sie nur aus einem einzigen Transistor.

Die Erklärung ist einfach. Der Emitterstrom des T1 fließt direkt in die Basis von T2.
Steigt der Emitterstrom von T1, so erhält die Basis von T2 mehr Strom und T2 wird stärker leitend.

Bild 75. Emitterfolger

Bild 74. Aufbau zu Schaltung 75

10.5 Darlington-Schaltung

Ein Schaltungsgebilde nach Abbildung 76 (Aufbau 77) nennt man Darlington-Verstärker oder einfach **Darlington-Schaltung**. Sie hat eine immens hohe Stromverstärkung, die sich durch Multiplikation der Stromverstärkungen B1 und B2 der beiden Transistoren ergibt. Eine kleine Kostprobe erhalten wir, wenn wir bei brennender LED die Brücke x herausziehen und Steckfedern 43 und 53 leicht mit einem **trockenen** Finger berühren: ein ganz winziger Strom durch den Finger wird so gewaltig verstärkt, daß die LED sofort aufleuchtet.

Bild 76. Darlington-Schaltung

10.6 Elektronische Klopfzeichen

Eine Variante der Darlington-Schaltung entsteht, wenn man das Prinzip, daß der Emitterstrom des ersten Transistors direkt in die Basis des zweiten fließt, beibehält, jedoch die beiden Kollektoren zusammenschaltet und gemeinsam auf einen Widerstand arbeiten läßt. Im Schaltplan für das Finger-Morseübungsgerät (Abbildung 78) ist der Darlington-Verstärker zum besseren Verständnis in ein graues Kästchen gesetzt. Gemorst wird, indem man mit einem Finger im Rhythmus der Morsezeichen leicht auf die Steckfedern 30 und 31 schlägt.

Bild 77. Aufbau zu Schaltung 76

Bild 78. Finger-Morseübungsgerät

Bild 79. Aufbau zu Schaltung 78

11. Transistor als Schalter

11.1 Kontaktlose Schalter

In Kapitel 1.1 wurde bereits kurz angedeutet, daß mechanische Schalter mit ihren verschleißanfälligen Kontakten oftmals Kummer bereiten. Schon immer haben Elektroniker darüber nachgedacht, wie man rein elektronisch – also ohne mechanische Kontakte – schalten kann. Es liegt nahe, den Transistor als Schalter zu benutzen, denn wir wissen ja inzwischen: ein leitender Transistor läßt den Strom (vom Kollektor zum Emitter) passieren wie ein geschlossener Schalter, und ein gesperrter Transistor wirkt wie ein offener Schalter.
Aber ein mechanischer Schalter hat einen Knebel zum Ein- und Ausschalten, ein Transistor hingegen bietet uns seine Basis zur (elektronischen) Betätigung an.
Bevor wir in den nächsten Abschnitten eine Reihe von vollelektronischen Schaltern kennenlernen werden, sollten wir uns folgendes klarmachen: so elegant und reizvoll es auch erscheint, einen Transistor statt eines mechanischen Schalters einzusetzen, so dürfen die Nachteile nicht verschwiegen werden. Während ein herkömmlicher Schalter im geschlossenen Zustand fast ideal leitend ist (der Kontaktwiderstand beträgt nur einige Milliohm), muß man sich damit abfinden, daß am leitenden Transistor zwischen Kollektor und Emitter stets eine Spannung, die sogenannte **Kollektor-Emitter-Restspannung**, ansteht (bei Siliziumtransistoren etwa 0,3V). Auch im gesperrten Zustand ist der Transistor

dem (geöffneten) mechanischen Schalter unterlegen: im Gegensatz zum mechanischen Schalter, der den Stromkreis 100%ig unterbricht, fließt beim gesperrten Transistor stets ein ganz, ganz winziger, aber doch meßbarer Strom.
Diese Verhältnisse wollen wir bei den nachfolgenden Betrachtungen jedoch außer acht lassen und eine ideale (oder sagen wir: zufriedenstellende) Schalterfunktion des Transistors annehmen.

11.2 Transistoren im Wechselschritt: Nur einer kann leiten

Ein Transistor in Emitterschaltung (Arbeitswiderstand in der Kollektor-Leitung) invertiert: ein positives Signal an der Basis macht ihn leitend, so daß man vereinfacht annehmen darf, der Kollektor sei direkt mit dem Minuspol der Batterie verbunden – der Transistor-Schalter ist also geschlossen. Liegt die Basis dagegen am Minuspol der Batterie, so sperrt der Transistor, und am Kollektor liegt (über den Arbeitswiderstand) eine positive Spannung an – ein gesperrter Transistor wirkt wie ein geöffneter Schalter. Man sieht sofort, daß ein zweiter Transistor, dessen Basis mit dem Kollektor des ersten verbunden ist, stets den entgegengesetzten Schaltzustand einnehmen muß: Leitet der erste, so ist der zweite gesperrt, sperrt der erste, so ist der zweite leitend. In Kap. 10.3 wurde diese Verhaltensweise bereits experimentell erprobt; sie ist für die nachfolgenden Schaltungen von entscheidender Bedeutung.

11.3 Das Flipflop – ein Computerelement

Von einem Computerelement soll zunächst die Rede sein, das wie keine andere Schaltung Weltruhm erlangt hat: im Fachjargon wird es Flipflop, von ernsthaften Leuten **bistabiler Multivibrator** oder auch bistabile Kippstufe genannt.

Flipflops befinden sich zu Tausenden und Millionen in Computer-Speichern, dort allerdings in Form von Integrierten Schaltungen (IC = engl. Integrated Circuit), die auf einem Siliziumplättchen von einigen Quadratmillimetern (Chip) Zehntausende von solchen Flipflops beherbergen können. Bi heißt zwei. Ein bistabiles Element hat demnach zwei stabile Zustände: In Schaltung 81 kann entweder der linke oder aber der rechte Transistor leitend sein, niemals jedoch beide gleichzeitig.

Bild 80. Aufbau zu Schaltung 81

Bild 81. Ein Computer-Element namens Flip-Flop

Drückt man einmal und dann nicht mehr, so bleibt der eingenommene Zustand für ewig gespeichert (solange die Schaltung mit Strom versorgt wird!).
Was kann eigentlich gespeichert werden?
Nun, z.B. eine „Antwort": man mag da an entsprechende Fernsehsendungen denken, bei denen eine Gruppe aus dem Publikum Schiedsrichter spielen muß, indem die JA-Taste oder die NEIN-Taste gedrückt wird. Eine einmal eingegebene Antwort bleibt dann für alle sichtbar gespeichert.
Auch bei Alarmanlagen sind elektronische Speicherelemente erwünscht: ein einmal ausgelöster Alarm soll so lange „gespeichert" bleiben, bis er z.B. vom Besitzer der Anlage abgeschaltet wird.

Bild 82. Flipflop-Modell mit einem kleinen Schönheitsfehler: Das Wasser muß bergauf fließen!

Die beiden Zustände sind also: linker Transistor leitend und rechter gesperrt oder rechter Transistor leitend und linker gesperrt. Da jeweils der Kollektor des einen mit der Basis des anderen verbunden ist, kann sich an einem einmal eingenommenen Zustand nichts ändern, solange von außen nichts auf die Schaltung einwirkt.
Externe Signale simulieren wir nun, indem wir abwechselnd auf Taster Ta1 bzw. Ta2 drücken (Aufbau 80) und damit entweder die Basis von T1 oder die von T2 mit dem Minuspol der Batterie verbinden: LED2 bzw. LED1 gehen an oder aus, je nachdem wie der vorhergehende Zustand war.

11.4 Sirenen-Alarmanlage „Einbrecher-Schreck"

Die raffinierte Alarmanlage nach Bild 83 läßt keinem Einbrecher eine Chance: Wird die Verbindung zwischen den Steckfedern 60 und 70 unterbrochen (wir simulieren den Einbruchsfall durch Herausziehen der betreffenden Drahtbrücke; beim praktischen Einsatz wird statt der Drahtbrücke ein Stolperdraht oder aber ein Tür- bzw. Fensterkontakt verwendet), so heult die Sirene los. Sie kann nur dann zum Schweigen gebracht werden, wenn der Kontakt zwischen den genannten Steckfedern wieder hergestellt **und** die Rücksetztaste, die man irgendwo gut versteckt anordnen kann, betätigt wird.

Bild 83. Aufbau zu Schaltung 84

Bild 84. Alarmanlage „Einbrecherschreck“

In Bild 86 erkennt man, daß – wie es sich für ein Flipflop gehört – jeweils der Kollektor des einen Transistors mit der Basis des anderen verbunden ist. Gegenüber dem einfachen Flipflop aus Bild 81 hat sich allerdings einiges verändert: Hinzugekommen sind die beiden Dioden, die beiden Elkos und die Widerstände *R*1 und *R*2. Das Überraschende ist, daß eine einzige Taste bei dieser Schaltung ausreicht, um das Flipflop hin- und herzuschalten: ein Tastendruck bringt es in den einen Zustand, ein nochmaliger Druck auf dieselbe Taste läßt es wieder zurückspringen.

Zum Verständnis nehmen wir an, T1 sei leitend und T2 gesperrt. Dann kann sich *C*2 über die Widerstände *R*1 und *R*4 entladen, *C*1 hingegen über *R*2 und *R*v2 einerseits und die Basis-

Im linken Teil von Schaltung 84 erkennen wir ein Flipflop, das allerdings für die Einbrecherjagd etwas verändert wurde: der Widerstand *R*1 sorgt im Verein mit der Diode D1 dafür, daß der Transistor T1 im Alarmfall so lange leitend bleibt (und somit das Alarmsignal ertönt), bis sowohl der zerrissene Stolperdraht repariert als auch die Rücksetztaste betätigt wurden.

11.5 Elektronisch zählen

Elektronik-Zähler (der Fachmann nennt sie auch **Digitalzähler**) enthalten eine Kette von speziellen Flipflops, von denen wir nun eines kennenlernen wollen.

Bild 85. Aufbau zu Schaltung 86

Bild 86. Elektronischer Wechselschalter

Emitterdiode andererseits aufladen. In dieser Situation wird nun der Taster gedrückt, die Plusanschlüsse der Elkos werden also jeweils über die Dioden D1 und D2 mit dem negativen Pol der Batterie verbunden. Für *C*2 hat dies keinerlei Auswirkungen, er bleibt zunächst entladen. An *C*1 jedoch findet ein Umladevorgang statt: der Anschluß, der zuvor positiv war, wird nun über Taster und Diode schlagartig negativ. Und hier kommt uns jetzt unsere Erkenntnis über die Fernwirkung von elektrischen Kräften am Kondensator (siehe Kap. 8.1) sehr zustatten: Die Elektronen am Minusanschluß des Kondensators werden zur Basis des Transistors zurückgedrängt und sperren ihn (natürlich, denn Elektronen haben ja eine negative Ladung!). Diesen Verdrängungseffekt durch das schlagartige Umladen eines Kondensators nennen die Elektroniker einen Impuls und würden in ihrer Fachsprache formulieren, daß T1 durch einen negativen **Impuls** gesperrt wird.

Das Sperren von T1 setzt nun den bereits hinlänglich bekannten Flipflop-Mechanismus in Gang: über *R*4 und *R*v1 wird T2 leitend und hält über *R*3 seinen Partnertransistor gesperrt; der durch den Impuls bewirkte Zustand bleibt also stabil. Ein Blick auf die beiden Kondensatoren zeigt, daß sich die Ladezustände umgedreht haben. *C*1 hat sich über *R*2 und *R*3 entladen, *C*2 hingegen kann sich über *R*1 und *R*v1 sowie die Basis-Emitter-Strecke von T2 aufladen. Es bedarf jetzt keiner großen Gedankensprünge mehr, sich vorzustellen, daß bei einem nochmaligen Druck auf die Taste der Transistor T2 zum Sperren und T1 zum Durchschalten veranlaßt wird.

Kommen wir zurück zum Elektronik-Zähler und ersetzen in Gedanken den Tast-Schalter durch einen Transistor-Schalter. Bild 87 zeigt die Schaltung eines Zählers, der von 0 bis 7 zählen kann. Dazu werden drei Flipflops benötigt. Jedesmal, wenn in einer Flipflopstufe der rechte Transistor leitend wird, gibt er dem linken Transistor der nachfolgenden Stufe einen negativen Sperr-Impuls, welcher – wie wir wissen – ein Umschalten dieser Stufe bewirkt.

In Bild 88 haben wir tabellarisch dargestellt, welche 8 Zustände die LED's eines Zählers mit 3 Flipflops einnehmen, wenn auf den Eingang der

Bild 87. Digitalzähler von 0 bis 7 mit drei Flipflops

ganz linken Stufe nacheinander 8 negative Impulse gegeben werden. Ordnet man den sich ergebenden „Leuchtdioden-Mustern" die dezimalen Zahlen von 0 bis 7 zu, so haben wir erreicht, was beabsichtigt war: eine Elektronik, die negative Impulse abzählt.

Impuls - Nr.	LED1	LED2	LED3	Dezimal-zahl
kein Impuls	●	●	●	0
erster Impuls	☼	●	●	1
zweiter Impuls	●	☼	●	2
dritter Impuls	☼	☼	●	3
vierter Impuls	●	●	☼	4
fünfter Impuls	☼	●	☼	5
sechster Impuls	●	☼	☼	6
siebter Impuls	☼	☼	☼	7
achter Impuls	●	●	●	(8)*

*zur Darstellung der Zahl 8 wäre die LED einer vierten Flipflopstufe erforderlich

Bild 88. Zustandstabelle des Digitalzählers von Bild 87

11.6 Zwei Transistoren im Dauerstreß: Der astabile Multivibrator

Fast jeder Elektroniker beginnt seine Karriere mit dem Aufbau einer Blinkschaltung. Viel später erst erfährt er, daß man ein solches Gebilde **astabilen Multivibrator** nennt (im Gegensatz zum Flipflop ist es also eine nichtstabile Schaltung), und nur ganz wenige haben den Ehrgeiz, sich in das Verständnis dieser reizvollen Elektronik-Konstruktion hineinzustürzen. Dabei ist das im Grunde gar kein Problem, wenn man sich mit der Wirkung von Kondensatoren vertraut gemacht und den Erklärungen über den Begriff „Impuls" im letzten Kapitel gefolgt ist.
Der astabile Multivibrator (hier als Blinkschaltung) wird nach Bild 89 aufgebaut. Die beiden Leuchtdioden geben uns bereits einen klaren Hinweis auf die Arbeitsweise der Schaltung: stets ist ein Transistor gesperrt und der andere leitend, aber sie wechseln sich ohne unser Zutun automatisch ständig ab.
Mit einem Blick auf Schaltbild 90 stellen wir uns wieder vor, der linke Transistor T1 sei leitend und T2 gesperrt. Kondensator *C*1 lädt sich über die Basis-Emitterdiode von T1 und den Widerstand *R*v2 rasch auf (kleine Zeitkonstante wegen des geringen Ohmwertes) und behält diesen Ladezustand zunächst bei. An *C*2 passiert allerdings etwas sehr Merkwürdiges: über den leitenden Transistor T1 und den Widerstand **R**2 lädt er sich langsam auf, aber – man sieht's mit Schrecken – er steckt für diesen Ladevorgang verkehrt gepolt in der Schaltung. Ehe wir jedoch um unseren Kondensator bangen, wollen wir in Ruhe weiterverfolgen, was an seinem Minusanschluß geschieht. Der rettende Moment tritt ein, wenn die Ladespannung etwa +0,6V erreicht: bei dieser Spannung, die ja auch an der Basis von T2 anliegt, wird dieser Transistor leitend. Und jetzt überstürzen sich die elektronischen Ereignisse: am Kollektor von T2 wechselt die Polarität der Spannung von Plus auf Minus, dieser Wechsel teilt sich über den geladenen Kondensator *C*1 als negativer Impuls der Basis von T2 mit, woraufhin dieser sperrt. Jetzt haben sich die Verhältnisse also umgekehrt: T1 ist gesperrt und T2 leitend; *C*1 lädt sich rasch auf, und an *C*2 startet ein langsamer Ladevorgang... ohne viel Fantasie kann man nun überblicken, wie dieses ständige Wechselspiel zwischen den beiden Transistoren bis in alle Ewigkeit andauert –

Bild 89. Aufbau zu Schaltung 90

Bild 90. Astabiler Multivibrator

vorausgesetzt, die Spannungsversorgung wird nicht abgeschaltet.
So ganz nebenbei ist bereits verständlich geworden, daß die Blinkfrequenz von den Ladezeiten, also von *C*1 und *R*1 bzw. *C*2 und *R*2 abhängt: große Kondensatoren und Widerstände – kleine Blinkfrequenz; kleine Kondensatoren und Widerstände – hohe Blinkfrequenz.
(verschiedene Werte ausprobieren).

11.7 Der Trigger des Herrn Schmitt

Einen Mann namens Schmitt plagte einst ein Problem: er hatte für einen Computerhersteller ein Spannungs-Überwachungsgerät zu konstruieren, das Alarm auslösen sollte, wenn die Computerspannung unter einen bestimmten Wert absank – denn... nichts ist für einen Computer-Freak ärgerlicher, als wenn infolge eines Spannungseinbruches sein Programm abstürzt. Um jedes Risiko auszuschalten, forderte man von Herrn Schmitt zusätzlich, daß sich der Alarm erst dann abschalten sollte, wenn der Spannungswert wieder deutlich in die Höhe geklettert war.
Die Schaltung, die Herr Schmitt entwickelte, wird heute in Elektronikerkreisen unter dem Namen **Schmitt-Trigger** außerordentlich geschätzt (auslösen heißt auf Englisch übrigens ‚to trigger' – daher der Name!). Sie dient für unzählige Anwendungszwecke als Schwellwertschalter mit **Hysterese**, was auf gut Deutsch nichts weiter bedeutet, als daß die Spannungswerte zum Ein- und Ausschalten („Schwellen") unterschiedlich hoch sind. Die Schaltung eines solchen Triggers zeigt Bild 92.

Wir können das Schmitttrigger-Verhalten experimentell mit dem Aufbau nach Bild 91 erproben, indem wir das Potentiometer langsam verdrehen, bis die Leuchtdiode angeht, und sie dann durch vorsichtiges Zurückdrehen wieder zum Erlöschen bringen. Die Stellungen des Poti-Knopfes zum Ein- und Ausschalten werden erstaunlich weit auseinanderliegen!

Bild 92. Schmitt-Trigger

Bild 91. Aufbau zu Schaltung 92

11.8 Schwingen? Nein danke! – Das Monoflop

Eine Schaltung, die nur eine einzige Schwingung ausführt, also für eine gewisse Zeit von einem Ruhezustand in einen „aktiven" Zustand wechselt und dann von selbst in die Ruhelage zurückkehrt, nennt man **monostabilen Multivibrator** oder etwas salopp Monoflop. In der Praxis wird sie als Zeitschaltung, im neudeutschen Sprachgebrauch auch als ‚Timer' bezeichnet, eingesetzt: durch einen negativen Impuls wird sie „gekippt", eine Leuchtdiode (oder aber irgendein Gerät, eine Sirene, eine Treppenhausbeleuchtung usw.) wird eingeschaltet und nach einer Weile von selbst wieder abgeschaltet.

Bei dem Aufbau nach Bild 93 simulieren wir den negativen Impuls durch Drücken der Taste.

Für die Dauer vo etwa 10 Sekunden geht LED_1 an und LED_2 aus. Dann tut sich nichts mehr, solange wir nicht erneut drücken.

Bild 93. Aufbau zu Schaltung 94

Schaltbild 94 gibt Aufschluß über die Funktionsweise. Wir nehmen an, die Leuchtdiode LED1 sei dunkel, also T1 gesperrt und T2 leitend (LED2 leuchtet). Wie üblich richten wir unser Augenmerk auf den Kondensator: über *R*v1 einerseits und die Basis-Emitterdiode andererseits ist er prallvoll geladen. Jetzt wird T2 kurzzeitig gesperrt (Tastendruck!). T1 erhält nun über *R*3 und *R*v2 Basisstrom und leitet, an seinem Kollektor wechselt die Spannung schlagartig von positiver auf negative Spannung, und ein kräftiger negativer Impuls über den Kondensator unterstützt zunächst das Sperren von T2, so daß man die Taste wirklich nur für einen winzigen Moment zu drücken braucht. Der Kondensator beginnt nun, sich über R2 und die leitende Kollektor-Emitterstrecke aufzuladen – wiederum mit verkehrter Polarität (siehe auch astabiler Multivibrator)! Am rechten Kondensatoranschluß steigt die Spannung nun langsam an (die Geschwindigkeit hängt von der Größe des Kondensators und des Widerstandes R1 ab), bis sie etwa 0,6V erreicht. Das ist der Wert, bei dem T2 leitend wird und damit den Basisstrom für T1 versiegen lassen kann: der ursprüngliche Zustand ist wieder hergestellt, die Monozeit ist abgelaufen.

Experimentieranregungen: Wir haben gesehen, daß die Monozeit von *C*1 und *R*2 abhängt. Durch Kombinieren der Widerstandswerte 15kΩ,

Bild 94. Monostabiler Multivibrator

100kΩ und 220kΩ mit den Kondensatorwerten 100µF und 470µF können Zeiten zwischen knapp einer Sekunde und zwanzig Sekunden erreicht werden.
Wir werden uns nun mit vollelektronischen Licht-, Temperatur-, Feuchtigkeits- und Magnetschaltern sowie auf Schall reagierenden Schaltern befassen.
Für die genannten Betätigungsarten wird jeweils ein Sensor (Fühler) benötigt, der Licht, Temperatur, Feuchte, Magnetismus oder Schall in eine elektrische Größe umsetzt.

11.9 Licht wird zum Schalten benutzt

Zum Schalten mit Licht haben wir einen Fototransistor zur Verfügung, auf den wir im Detail noch in Kapitel 14 zurückkommen werden.
Da sich Fototransistor und Infrarot-Diode je nach Hersteller zum Verwechseln ähnlich sehen können (und die IR-Diode, wie wir später noch ausführlich besprechen werden, kein sichtbares Licht aussendet), schlagen wir für den Fall der Fälle ein kleines Testexperiment vor, mit dem die beiden Bauteile eindeutig identifiziert werden können.
In den Aufbau nach Bild 95 stecken wir nacheinander die beiden Bauelemente so ein, daß das **kürzere Bein** zur Steckfeder **mit der Bezeichnung K** weist. Richtet man in einem abgedunkelten Raum jeweils das Licht einer Tisch- oder Taschenlampe **von oben** auf das zu testende Bauteil, so leuchtet die als Kontrollampe dienende Leuchtdiode bei Lichteinfall dann auf, wenn es sich um den Fototransistor handelt. Er wird bei Beleuchtung leitend und kann nun z.B. an der Seite durch einen kleinen Farbklecks für alle Zeiten gekennzeichnet werden.
Der Fototransistor hat keinen Basis-Anschluß und daher nur zwei Beine! Um ihn zum Leiten zu bringen, muß von außen ein „Lichtstrom“ (Photonen) auf ihn einwirken. Sehr eindrucksvoll können wir den Aufbau nach Abbildung 96 erproben, wenn wir ihn zunächst im halbdunklen Raum betreiben. Das Potentiometer wird so eingestellt, daß die Leuchtdiode gerade ausgeht. Das wird, wenn der Raum nicht allzu dunkel ist, ohne weiteres gelingen. Mit einer Taschenlampe

Bild 95. Prüfschaltung für Fototransistor/IR- Diode

Bild 96. Aufbau zu Schaltung 97

Bild 97. Lichtbetätigter Schalter

„zielen“ wir jetzt von oben auf den Fototransistor. Bei einem „Treffer“ leuchtet die LED sofort auf.

Wir sollten nun die Raumhelligkeit verändern und ein bißchen an P1 spielen. Wir werden feststellen, daß man mit dem Potentiometer die „Schaltschwelle“ an die Umgebungshelligkeit anpassen kann.

Schaltung 97 ist sehr leicht zu verstehen, wenn wir uns an die Ausführungen über die Invertierung von Kollektorfolgern erinnern: Wenn Tf leitet, so sperrt T1, und T2 ist infolgedessen leitend (Leuchtdiode brennt). Sperrt Tf hingegen, so leitet T1 während T2 wiederum sperrt (Leuchtdiode ist dunkel).

Was diese Experimente sehr deutlich gemacht haben: ohne Betätigen eines mechanischen Kontaktes können Schaltvorgänge ausgelöst werden; die Lebensdauer dieses elektronischen Schalters können wir praktisch zu „unendlich“ annehmen!

11.10 Automatisches Nachtlicht mit Schmitt-Trigger-Verhalten

Wir wollen die Funktion des auf Licht reagierenden Schalters nun umdrehen und fordern, daß die Leuchtdiode angeht, wenn die Umgebungshelligkeit unter einen bestimmten Wert absinkt. Ein automatisches Parklicht für ein Auto soll uns dabei als Beispiel dienen, und das rechtfertigt das Schmitttrigger-Verhalten: wenn es dunkel wird, so soll das Parklicht automatisch angehen, aber nicht sofort wieder verlöschen, sobald der Mond hinter einer Wolke hervorschaut und etwas Licht auf den Fototransistor wirft.

Das Gerät wird nach Bild 98 aufgebaut, Bild 99 zeigt die zugehörige Schaltung. T1 und T2 bilden den Schmitt-Trigger, dessen Eingangsspannung je nach Leitzustand des Fototransistors höher oder niedriger liegt. Das nachgeschaltete Verstärkermodul sorgt dafür, daß die LED nicht bei steigender, sondern bei sinkender Helligkeit angeht.

Bild 98. Aufbau zu Schaltung 99

11.11 Mehr Sicherheit im Straßenverkehr: eine Abblendautomatik

Die traurige Unfallbilanz des Straßenverkehrs ließe sich erheblich verbessern, wenn die Autos mit einer elektronischen Automatik ausgerüstet wären, die von Fernlicht auf Abblendlicht umschaltet, sobald ein Fahrzeug entgegenkommt. Die folgende Schaltung legen wir daher dem Herrn Verkehrsminister besonders warm ans Herz.

Bild 100 zeigt den Aufbau, Bild 101 die zugehörige Schaltung. Durch Drücken der Taste kann die LED, die uns das Fernlicht simuliert, eingeschaltet werden. Fällt nun Licht auf den Fototransistor (wir haben ihn für eine realistische Simulation bei unseren Versuchen mit einem kleinen schwarzen Pappröhrchen versehen), so wird T1 leitend, und das Flipflop kippt: Das Fernlicht geht aus und die Kontrolleuchte stattdessen an.

Bild 99. Automatisches Nachtlicht

Bild 100. Aufbau zu Schaltung 101

Bild 101. Abblendautomatik

11.12 Wärme schaltet Ton ein

Brandmelder erfüllen in der Praxis eine wichtige Funktion. In Kaufhäusern, Versammlungsräumen, Kinos usw. sind sie behördlich vorgeschrieben und lösen – wenn die Temperatur einen bestimmten Wert überschreitet – die Sprinkleranlage automatisch aus.

Mit einem kontaktlosen Thermoschalter nach Abbildung 102 wollen wir keine Wasserflut, sondern einen unüberhörbaren Warnton erzeugen. Der Wärmefühler ist der Transistor T1, der zusammen mit T2 in einer sogenannten Stromspiegelschaltung betrieben wird.

Bild 103. Brandmelder

Bild 102. Aufbau zu Schaltung 103

11.13 Wie kann eine elektronische Schaltung Wärme fühlen?

Jedes Bauelement verändert seine Eigenschaften bei Temperaturschwankungen. Oftmals sind diese Änderungen so gering, daß sie auf die Funktion der Schaltung keinen merkbaren Einfluß haben. Manchmal jedoch muß man gezielt Gegenmaßnahmen ergreifen, um Temperatureffekte auszugleichen.

Die Basis-Emitterspannung eines gewöhnlichen Transistors sinkt pro Grad Celsius um knapp 3 Millivolt. Das scheint nicht viel zu sein, hat aber Auswirkungen auf den Basisstrom (Basisstrom steigt), dessen temperaturbedingte Änderungen sich als erheblich vergrößerter Kollektorstrom bemerkbar macht. Dies kann bei Verstärkeranwendungen zu üblen Komplikationen führen.

11.14 Stabilisierung durch Spiegelung

Insbesondere in der Operationsverstärkertechnik (Operationsverstärker s. KOSMOS X4000, Kap. 17 dieses Buches) bedient man sich der Stromspiegelung, um hochverstärkende Transistorschaltungen bei Temperaturänderungen stabil zu halten. Bild 104 zeigt vereinfacht eine Stromspiegelschaltung, wie sie auch in unserem Temperaturwarngerät verwendet wird (in Schaltbild 103 besonders hervorgehoben). Sind beide Transistoren so angeordnet, daß sie stets die gleiche Temperatur haben (man sagt: sind sie thermisch gekoppelt), so bleibt der Strom durch $R2$ nahezu konstant, weil er wegen des gleichzeitigen Absinkens der Basis-Emitterspannungen von T1 und T2 ein „ Spiegelbild" des Stromes durch $R1$ ist.

Ganz anders entwickeln sich die Dinge, wenn z.B. nur der linke Transistor erwärmt wird. Dann sinkt dessen Basis-Emitterspannung allein, und das veranlaßt den rechten Transistor zu sperren: seine Kollektorspannung steigt und setzt über die Diode D1 den Alarmton in Gang.

Die ganze Sache funktioniert in umgekehrter Richtung natürlich auch bei Abkühlen eines Transistors. Wir werden das bei den Schaltungen „Eiswarner" und „Kühlwächter" ausnutzen.

Probiert man für $R1$ der Reihe nach die Widerstandswerte 470Ω, 1kΩ und 1,5kΩ aus, so wird man feststellen, daß die Empfindlichkeit der Schaltung steigt. Wenn man ein „günstiges" Transistorpaar erwischt hat, reagiert die Schaltung mit $R1$ = 1,5kΩ bereits, sobald man T1 anhaucht oder mit den Fingern erwärmt.

Bild 104. Prinzip der Stromspiegelung

11.15 Bei Kälte sehr sensibel: Der Eiswarner

Der Alptraum jedes Autofahrers ist die Grenzwetterlage zwischen Gefrieren und Tauen, also bei Außentemperaturen um den Nullpunkt. Für Entspannung beim Autofahren kann da die Elektronik mit einer Schaltung sorgen, die dann einen Warnton erzeugt, wenn das Thermometer unter – sagen wir – plus drei Grad Celsius absinkt.

Der bereits bekannte Temperaturschalter wird dazu nach Aufbaubild 105 etwas umgebaut (Schaltung 106). Neu ist das Potentiometer, mit

Bild 105. Aufbau zu Schaltung 106

Bild 106. Eiswarner/Kühlwächter

dem eingestellt werden kann, bei welcher Temperatur unser Gerät ansprechen soll.
Wie kann die Anlage auf z.B. null Grad Celsius „geeicht" werden? (Das Wort „eichen" ist falsch, denn eichen ist ein amtlicher Vorgang, den nur das Eichamt nach genauen Vorschriften der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ausführen kann; das, was der Laie üblicherweise als eichen bezeichnet, müßte korrekterweise „kalibrieren" heißen!). Will man sich nicht mit komplizierten Messungen und teuren Thermometern abgeben, so besteht die einzige Methode darin, den Temperaturfühler, also Transistor T1, in Eiswasser (Wasser mit darin schwimmenden Eiswürfeln) zu halten. Das kann man bewerkstelligen, indem man das Transistormodul aus der Steckplatte herauszieht, um seine „Beine" Verlängerungsdrähte wickelt, diese Drähte in die Steckplatte einsteckt und den Transistor „kopfüber" vorsichtig in das beschriebene Eiswasser hält, ohne daß die Anschlußbeine des Transistors eintauchen (das Wasser, das ja eine gewisse Leitfähigkeit besitzt, würde sonst eine Verbindung zwischen den Beinen herstellen!). Zugegeben, ein etwas heikles Unterfangen, aber wir haben es auch erfolgreich so durchgeführt, es führt auf jeden Fall zum Ziel: der Transistorkopf muß eine Weile im Eiswasser ausharren, sodann wird das Potentiometer so eingestellt, daß der Warnton gerade ausgeht. Die Wahrscheinlichkeit ist sehr groß, daß die Ansprechtemperatur nun einige wenige Grade um Null liegt.

11.16 Frostiger Wachhund: Elektronik überwacht Kühltruhe

Wenn man den Eiswarner auf den Kopf stellt, so kommt ein Kühlwächter heraus. Gemeint ist: der Kühlwächter muß in Aktion treten, wenn die Temperatur steigt. Insofern hat er die gleiche Funktion wie der Temperaturschalter, hier ist allerdings die Ansprechtemperatur mit einem Potentiometer einstellbar. Die Diode D1 in Aufbaubild 105 wird herausgezogen und umgedreht wieder eingesteckt – fertig! Wie kann die Funktion der Anlage überprüft werden?
Der als Temperaturfühler verwendete Transistor T1 kann in die zweite Steckplatte gesteckt und über Verlängerungsdrähte mit unserem Gerät verbunden werden. Die gesamte zweite Steckplatte muß sodann in der Tiefkühltruhe oder im Eisfach des Kühlschrankes Platz finden. Am Potentiometer kann eingestellt werden, bei welcher Temperatur der Kühlwächter Alarm schlagen soll (zum Ausprobieren kann man sich in einem Elektronik-Fachgeschäft auch sog. „Kältespray" besorgen und damit den Transistor anblasen).

11.17 Ist ein Transistor magnetisch?

Natürlich nicht, und wenn man einen elektronischen Magnetschalter aufbauen will, so muß man dafür sorgen, daß die Magnetkraft in eine elektrische Spannung umgewandelt wird. Das ist leicht zu bewerkstelligen: Man nehme eine Spule und einen Permanentmagneten (beides ist im „KOSMOS Junior-Elektrotechnik" vorhanden),

schließe die Spule an die Basis von T2 in Aufbau 107 an und lasse den Magneten in die Spule plumpsen. War der Magnet richtig herum gepolt, so spricht die Schaltung an, und die LED leuchtet auf.
(Sollte sie bereits beim Einschalten der Stromversorgung leuchten, so muß der Taster kurz gedrückt werden.)
In Schaltbild 108 erkennen wir wieder die bewährte Flipflop-Schaltung aus Kap. 11.3, allerdings ist hier an die Basis von T2 das eine Ende der Spule angeschlossen.
Was passiert, wenn eine Spule in einem Magnetfeld bewegt wird oder umgekehrt? Es wird in der Spule eine Spannung induziert (den Begriff der Induktion werden wir in Kap. 12.3 kennenlernen). Je nachdem welcher Magnetpol sich beim Fallenlassen des Magneten oben oder unten befindet, erhält die Basis einen negativen oder positiven Spannungsimpuls. Es ist klar, daß unsere Schaltung nur auf negative Impulse reagiert, weil dann der Transistor T2 kurzzeitig sperrt. Der ursprüngliche Zustand kann durch Drücken des Tasters wieder hergestellt werden.

Bild 108. Magnetbetätigter Schalter

Bild 107. Aufbau zu Schaltung 108

11.18 Sensorschalter mit Speicherung

Elektronik-Schalter, die auf Berühren reagieren, tragen den hochtrabenden Namen Sensorschalter. In den allermeisten Fällen beruht ihre Wirkung darauf, daß durch den Finger beim Berühren ein winziger Strom fließt, der ausreicht, um den Schaltvorgang auszulösen.
Als hochempfindliche Detektoren für geringste Ströme haben wir in Kap. 10.5 bereits die Darlington-Schaltung kennengelernt. Wir finden sie im linken Teil der Schaltung 110 wieder, während das Verstärkermodul im rechten Teil zweckentfremdet zu einem Umschalter umfunktioniert wird. Auf derlei Verwendungen des Verstärkermoduls werden wir ab Kap.13.10 noch zurückkommen.
Berührt man in dem Aufbau nach Bild 109 die Steckfedern x und y kurz mit dem Finger, so geht die Leuchtdiode an und bleibt brennen. Sie kann erst wieder durch Drücken des „Lösch"-Tasters ausgeschaltet werden.

Bild 109. Aufbau zu Schaltung 110

Bild 111. Aufbau zu Schaltung 112

Bild 110. Sensorschalter mit Speicherung

11.19 Geräusch-Schalter

Von der Babysitter-Lauschanlage bis hin zum akustischen Einbruchmelder – für den Einsatz einer „Elektronik-Schaltung mit Ohren" sind der Fantasie keine Grenzen gesetzt.

Als akustischer Fühler, also als Mikrofon, findet hier der Lautsprecher Verwendung: Ein Lautsprecher wandelt normalerweise elektrische Signale in mechanische Schwingungen, in Schall. Er kann jedoch auch umgekehrt Schall in eine elektrische Spannung wandeln. Empfängt er ein Geräusch (vor dem Lautsprecher in die Hände klatschen!), so erzeugt er eine

Bild 112. Einfacher Klatsch-Schalter

winzige Spannung, die vom Verstärkermodul gewaltig verstärkt und über die Diode (Schaltbild 112) einem Flipflop zugeführt wird. Eine einzige positive Spannungsspitze an der Basis von T1 genügt, um das Flipflop umzuschalten: Die Leuchtdiode geht an. Der Alarmzustand kann nur am Gerät selbst durch Drücken des Tasters wieder „gelöscht“ werden (Aufbaubild 111).
Experimentieranregung:
In die Schaltung kann das Potentiometer P1 eingefügt werden, so daß man die Empfindlichkeit stufenlos einstellen kann.

11.20 Ein und aus durch Klatschen

Maschinen, die auf Kommandos der menschlichen Stimme gehorchen: davon träumen die Techniker von heute und basteln emsig an Computerprogrammen für morgen, die in der Lage sind, das gesprochene Wort zu analysieren und zu identifizieren. Hier nun ein kleiner Vorgeschmack auf das, was uns die Technik vielleicht bis zur Jahrtausendwende bescheren wird: Man betritt einen dunklen Raum, klatscht in die Hände, und wie von Geisterhand betätigt, geht die Raumbeleuchtung an. Verläßt man das Zimmer, so genügt abermals ein kurzes Klatschen, um das Licht wieder abzuschalten. – Utopie?
Nein, überhaupt nicht. Schauen wir uns Schaltbild 114 an: links der bereits bekannte Mikrofonverstärker, rechts der elektronische Wechselschalter (Flipflop) aus Kap. 11.5. Statt der Leuchtdiode mit ihrem Vorwiderstand kann für praktische Anwendungen das KOSMOS Schaltrelais X (s. Ende des Buches) eingesteckt werden; Fernsehgerät, Tischlampe, Radio, Kaffeemaschine usw. lassen sich dann durch ein Geräusch (Klatschen, Pfeifen, Rufen) ein- und auch wieder ausschalten. Der Klatsch-Schalter wird nach Bild 113 aufgebaut.
Experimentieranregung:
Damit die Raumbeleuchtung nicht schon beim Klappen einer Tür unbeabsichtigt angeht, kann zur Einstellung der Ansprechempfindlichkeit das Potentiometer P1 in die Schaltung eingefügt werden (anstelle R4).

Bild 113. Aufbau zu Schaltung 114

Bild 114. Ein- und Ausschalten durch Klatschen

12. Radiotechnik

12.1 Wechselspannung: Läßt Elektronen zittern

Eine Spannung, die in regelmäßigen Zeitabschnitten ihre Polarität wechselt, heißt Wechselspannung. Würde man die Anschlüsse an der Batterie ständig gegeneinander vertauschen, dann würde im angeschlossenen Stromkreis ein Wechselstrom fließen. Eine Wechselspannung ändert andauernd ihre Polarität, Wechselstrom ändert fortlaufend seine Richtung. Es kommt daher nicht zu einer stetigen Elektronenwanderung in einer Richtung, sondern zu einer Hin- und Herbewegung um die Ruhelage im Leiter.
Bei unseren bisher durchgeführten Experimenten haben wir bereits mit Wechselspannungen und -strömen Bekanntschaft gemacht, ohne es gemerkt zu haben.
Der Lautsprecher des Tongenerators aus Kapitel 3.2 z.B. wird über den Kondensator *C2* mit Wechselspannung versorgt: während die Spannung am Ausgang des Verstärkers ständig zwischen 0V (Minuspol der Batterie) und etwa + 9V hin- und herpendelt (schwingt), wird der Kondensator *C2* fortlaufend geladen und entladen. Dadurch fließen die Elektronen zwischen dem Minuspol der Batterie, dem Lautsprecher und der einen Kondensatorplatte ständig hin und her. Die Vorgänge am Ausgang des Verstärkers und am Lautsprecher lassen sich gut in einem Spannungs-Zeitdiagramm darstellen. Abbildung 115 zeigt die Verhältnisse am Verstärker-Ausgang: Eine Spannung von 0V wechselt in regelmäßiger Folge mit einer Spannung von + 9V ab.

Bild 115. Rechteck-Gleichspannung

Bei der Abbildung 116 sieht man hingegen, daß am Lautsprecher – hervorgerufen durch das Rückfließen der Elektronen – auch negative Spannungen auftreten. Wegen des Polaritätwechsels heißt dieser Spannungsverlauf Wechselspannung.

Wie aus einer Gleichspannung, die ständig ein- und ausgeschaltet wird, eine echte Wechselspannung mit positiven und negativen Werten werden kann, zeigt Bild 117 sehr anschaulich: befindet sich der Schalter in der oberen Stellung, so wird der Kondensator geladen (Stromrichtung von rechts nach links). In der unteren Schalterstellung hingegen entlädt sich der Kondensator über den Lautsprecher (Stromrichtung von links nach rechts).

Bild 116. Rechteck-Wechselspannung

Bild 117. Umschalter zur Erzeugung von Wechselspannungen (technische Stromrichtung).

Für die Beschreibung eines Kurvenverlaufs verwendet man bestimmte Fachausdrücke, die wir kurz erläutern wollen.

Bild 118. Schalter in der waagerechten Position: Strom fließt aus der Batterie in der einen Richtung...

Bild 119. Schalter in der senkrechten Position: Strom fließt aus dem Kondensator in der anderen Richtung.(reale Stromrichtung).

Den Abstand eines Kurvenpunktes von der Zeitachse, man spricht auch von Auslenkung, nennt man **Amplitude**. Es gibt negative und positive Amplituden.

Kurven, die nach einer bestimmten Zeit *T* immer wieder denselben Verlauf zeigen, heißen periodisch. Die Zeit *T* wird als **Periode** und ihr Kehrwert als **Frequenz** *f* bezeichnet.

(F15) $f = \frac{1}{T}$

Wenn man *T* in Sekunden mißt, so wird die Frequenz in Hertz (Hz) angegeben.

Bild 120. So kann man sich das Enstehen einer Sinuskurve vorstellen.

In Bild 116 ist die Periode T 1 Sekunde und entsprechend die Frequenz $f = 1\,Hz$.

Eine Sonderstellung unter periodischen Kurven nimmt die Sinuskurve ein. Wie man sich das Zustandekommen einer Sinuskurve vorstellen kann, zeigt Abbildung 120.

Technisch hat vorwiegend der sinusförmige Kurvenverlauf Bedeutung. Generatoren z.B., die unser Lichtnetz speisen, erzeugen Sinusspannungen. Die Wechselspannung in der Steckdose beträgt 220V und hat eine Frequenz von 50Hz.

12.2 Von der Schwingung zur Welle

Bei höheren Frequenzen spricht man nicht einfach von Wechselstrom, sondern von Schwingungen, die zunächst ganz grob je nach Frequenz in **Niederfrequenz** (NF; hörbarer Bereich von ca. 16Hz bis 16kHz) und **Hochfrequenz** (HF; Radiowellen von ca. 250kHz bis 110MHz) unterteilt werden.

Eine Schwingung, die sich nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich ändert, sich also fortbewegt, nennt man Welle. Wasserwellen, aber auch Schallwellen sind jedem von uns geläufig.

Wenn wir einen Stein ins Wasser werfen, entstehen um die Einschlagstelle kreisförmige Wasserwellen, die sich ausbreiten. Sie tun das mit etwa 2m je Sekunde. Wenn der Topf mit der Fahne (Bild 121) von ihnen erreicht wird, schaukelt er mit der Frequenz der Wasserwellen auf und ab. Haben die Wellen z.B eine Frequenz von vier Schwingungen je Sekunde, so beträgt der Abstand zwischen zwei Wellenbergen 0,5m. Diesen Abstand nennt man **Wellenlänge**. Sie errechnet sich, indem man Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Frequenz teilt.

Bild 121. Zum Begriff der Wellenlänge

Während Wasser- und Schallwellen an ein Medium (Flüssigkeiten, Gase, feste Körper) gebunden sind, können sich sog. elektromagnetische Wellen (und dazu gehören z.B. Licht-, Radio und auch Röntgenwellen) auch im Vakuum ausbreiten (natürlich, wie hätte sonst ein Funkkontakt zwischen Erde und Mond bei der Expedition von Menschen auf dem Mond am 20. Juli 1969 stattfinden können? – Und das gilt gleichermaßen für die uns heute schon selbstverständlich gewordene Satellitentechnik!).

Die elektromagnetischen Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, mit dem unvorstellbar hohen Betrag von 300.000km/s. Ihre Wellenlänge erhalten wir nach Formel F16, wobei λ das Formelzeichen für die Wellenlänge ist (griechischer Kleinbuchstabe Lambda).

(F16) $$\lambda\,(m) = \frac{300\,000\,(km/s)}{f\,(kHz)}$$

Der Stuttgarter Sender hat bei einer Frequenz von 576kHz also eine Wellenlänge von 520,83m.

Bevor wir uns dem Aussenden und Empfang von Radiowellen zuwenden, wollen wir rasch noch die Eigenschaften von Spulen kennenlernen, die neben anderen Bauteilen stets in einem Radioempfänger zu finden sind.

12.3 Selbstinduktion

Aus dem Physikunterricht wissen wir sicher noch, daß jede stromdurchflossene Spule ein Magnetfeld erzeugt („Elektromagnet“). Vielleicht nicht mehr ganz so deutlich ist uns hingegen die Tatsache im Gedächtnis, daß beim Abschalten des Stromes in der Spule eine Spannung induziert wird, die den Stromfluß aufrechtzuerhalten versucht, bis die Energie des Magnetfeldes sich verbraucht hat. Dies nennt man „Selbstinduktion“. Eine Spule, in der bei einer Stromänderung von 1A je Sekunde eine Spannung von 1V induziert wird, hat eine Selbstinduktion (L) von 1 Henry (H).

Dieser Zusammenhang bedeutet, daß die Höhe der Selbstinduktionsspannung nicht nur von der Selbstinduktion *L* einer Spule (große Windungszahl = große Selbstinduktion) oder von der Größe der Stromänderung, sondern auch von der Geschwindigkeit der Stromänderung abhängt. Die Maßeinheit Henry ist nach dem amerikanischen Physiker Joseph Henry (1797-1878) benannt, der 1834 die Induktion entdeckt hat.

Bild 122. Aufbau zu Schaltung 123

12.4 Energie-Wandlung

In Aufbau 122 benutzen wir Lautsprecher und Ohrhörer als zwei in Reihe geschaltete Spulen, deren Selbstinduktion nun nachgewiesen werden soll (Schaltbild 123).

Wir drücken den Taster mehrmals kurz und beobachten die LED: Sie blinkt jedesmal in dem Augenblick kurz auf, wenn wir den Taster gerade loslassen. Das ist deutlicher zu sehen, wenn wir den Taster so rasch wie möglich loslassen, also z.B. mit dem Fingernagel drücken, den wir dann rasch seitlich wegziehen, so daß der Taster hochschnappt (Experiment im abgedunkelten Raum durchführen – bei einigen Leuchtdioden ist das Aufleuchten nur ganz, ganz schwach zu sehen!).

Zweierlei konnte beobachtet werden:

1. Je schneller der Strom geändert (in diesem Falle abgeschaltet) wird, desto größer ist die induzierte Spannung (Helligkeit der Leuchtdiode).

Bild 123. Induktionsversuch

2. Die induzierte Spannung ist gegenüber der Batteriespannung entgegengesetzt gepolt (Leuchtdiode ist für Batteriespannung in Sperrrichtung gepolt).

12.5 Pendeln zwischen zwei Zuständen

Im vorigen Kapitel haben wir beobachtet, daß eine stromdurchflossene Spule ein Magnetfeld aufbaut. Die in diesem Magnetfeld gespeicherte magnetische Energie hatte sich im Augenblick der Stromunterbrechung in elektrische Energie zurückverwandelt, mit der wir eine Leuchtdiode aufblinken ließen. Wenn wir diese Energie stattdessen einem Kondensator zuleiten, lädt er sich auf und hat damit elektrische Energie gespeichert. Sobald die Aufladung beendet ist, beginnt der Kondensator, sich über die Spule wieder zu entladen. Dieser Entladestrom baut um die Spule wieder ein Magnetfeld auf, und damit ist

die elektrische Energie wieder in magnetische Energie zurückverwandelt.
Die Energie pendelt also immer zwischen zwei Zuständen hin und her, sie wird abwechselnd in elektrische und magnetische Energie verwandelt. Eine Schaltung, die dieses Hin- und Herpendeln ermöglicht, nennt man **Schwingkreis**. Bild 124 zeigt das Prinzipschaltbild eines aus *L* und *C* bestehenden Parallelschwingkreises. Solange der Taster gedrückt ist, fließt durch die Spule ein Strom, der das Magnetfeld aufrechterhält. Sobald der Taster losgelassen wird, beginnt die Energie, zwischen *L* und *C* hin- und herzupendeln.

Bild 124. Grundschaltung eines Schwingkrei-

Das Hin- und Herschwingen wird umso langsamer, je größer die Kapazität des Kondensators und die Induktivität der Spule sind. Die Anzahl der Schwingungen läßt sich nach der Thomsonschen Schwingungsformel F17 in Hz berechnen, wenn man *C* in Farad und *L* in Henry einsetzt. Die Formel ist zu Ehren des englischen Physikers William Thomson (1824-1907, ab 1892 Lord Kelvin) benannt.

(F17) $$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

Theoretisch müßten sich diese Schwingungen unendlich fortsetzen. Da der Spulendraht dem Stromfluß jedoch einen Widerstand entgegensetzt, entstehen Wärmeverluste, die die pendelnde Energie langsam aufzehren. So nimmt die Schwingungweite (Amplitude) von Schwingung zu Schwingung etwas ab (Bild 125). Einen so verlaufenden Schwingungszug nennt man **gedämpfte Schwingung**.

Bild 125. Gedämpfte Schwingung

Bild 126. Ungedämpfte Schwingung

Bild 126 zeigt eine **ungedämpfte Schwingung**, die sinusförmigen Verlauf hat und entsteht, wenn man die Verluste (außer Wärmeverlusten in der Spule entstehen noch Streuverluste des magnetischen Feldes und dielektrische Verluste beim Umladen des Kondensators) bei jeder Schwingung ausgleicht. Die negativen Halbwellen kommen dadurch zustande, daß das Magnetfeld sich in umgekehrter Richtung aufbaut, wenn der Strom aus dem Kondensator zurückfließt, und der Kondensator dann anschließend entgegengesetzt gepolt geladen wird.

12.6 Eine Kuh säuft ihre eigene Milch

Bild 128 zeigt eine Schaltung, die einen Schwingkreis zu ungedämpften Schwingungen anregt, man nennt sie **Oszillatorschaltung.** Darin wird T1, in dessen Kollektorleitung der Schwingkreis eingefügt wird, in „Basisschaltung" betrieben (Basis auf fest eingestelltem, unveränderlichem Spannungswert, Emitter = Eingang , Kollektor = Ausgang des Transistors). Als Induktivität wird wieder die Spule des Ohrhörers benutzt: Da der Spulendraht des Ohrhörers einen Widerstand von etwa 600Ω besitzt, ist in Bild 128 das „Ersatzschaltbild" des Hörers, bestehend aus der Reihenschaltung einer Induktivität mit einem Widerstand, eingezeichnet. Durch den Einschaltstromstoß wird der Schwingkreis angeregt. Ein Teil der Wechselspannung des Schwingkreises wird dem „Eingang" des Transistors (das ist bei einer Basisschaltung der Emitter) zugeführt, der dadurch im Takte der Schwingungen gesteuert wird. Nun verstärkt der Transistor die ankommenden Schwingungen und erhält so die Schwingungen im Schwingkreis durch sein Ausgangsignal aufrecht. Man könnte den Transistor mit einer Kuh vergleichen (Bild 129), die von der durch sie produzierten Milch (verstärkte Schwingungen) einen Teil wieder zum Saufen bekommt (vom Ausgang abgezweigte Schwingungen).

Diese Schwingschaltung heißt kapazitive Dreipunktschaltung oder, nach ihrem Erfinder, Colpitts-Oszillator (Aufbau nach Bild 127). Sie schwingt mit einer Frequenz, die sich aus Formel F17 berechnen läßt. Sie beträgt in unserem Fall etwa 2kHz. Die Frequenz, bei der ein Schwing-

Bild 127. Aufbau zu Schaltung 128

Bild 129. Positive Rückkopplung: Die Kuh bekommt einen Teil ihrer eigenen Milch zurück

Bild 128. Tongenerator mit Schwingkreis

kreis ungedämpfte Schwingungen ausführt, heißt **Resonanzfrequenz.**

12.7 Zwischen Sender und Empfänger

Wir wollen jetzt zum Rundfunkempfang zurückkehren. Da interessiert natürlich: Wie überwinden die Rundfunksendungen den Raum zwischen Sender und Empfänger? Wir wissen inzwischen, daß eine stromdurchflossene Spule von einem magnetischen Kraftfeld umgeben ist und ein geladener Kondensator zwischen seinen beiden Belägen (Platten) ein elektrisches Kraftfeld hat. Beide Felder durchsetzen den Raum, haben beim geschlossenen Schwingkreis aber keine Fernwirkung. Das elektrische Feld kann zwischen den dicht gepackten Kondensatorbelägen nicht herauskommen, und das magnetische Feld, das einen geschlossenen Stromkreis umgibt, hat eine geringe räumliche Ausdehnung von nur wenigen Vielfachen des Kreisdurchmessers.

Wenn wir den Schwingkreis öffnen, ändert sich

Bild 130. Offener Schwingkreis

Bild 131. Ein selbstschwingender Sendemast

das: Bild 130 zeigt, wie beim Aufbiegen des Kondensators die elektrischen Kraftlinien (e) länger werden. Beim sog. offenen Schwingkreis werden die Kondensatorbeläge durch Antennendraht und Erde gebildet. Hier können die magnetischen Kraftlinien (m) sich wie Kreiswellen um einen ins Wasser geworfenen Stein nach allen Seiten ausbreiten. Die elektrischen Kraftlinien folgen den magnetischen, so daß sich das ganze Feld von der Antenne löst und in Pfeilrichtung (b) in den Raum wandert. Moderne Sendeantennen haben keine waagerechten Drähte mehr, sondern sind selbstschwingende Masten, die 1/4 der Wellenlänge hoch sind (Bild 131).

12.8 Antenne und Erde

Am Empfangsort wirken die elektrischen Feldkräfte der Radiowellen auf die von uns aufgespannte Antenne und lassen die Elektronen darin hin- und hersausen. Als Antenne wird ein ca. 6m langer Draht an der Wand, möglichst dicht unter der Zimmerdecke, befestigt; ein zweiter Draht wird als Erdleitung mit den metallisch blanken Teilen eines Heizkörpers oder eines Wasserhahns verbunden. Werden nun Antenne und Erde mit einem Schwingkreis verbunden und stimmt außerdem die Frequenz der gerade empfangenen Radiowelle mit der Resonanzfrequenz des Schwingkreises überein, so wird dieser zu anhaltenden, also ungedämpften Schwingungen angeregt. Um die Resonanzfrequenz der Frequenz der einfallenden Radiowelle genau anzupassen, können Drahtbrücken, die zusätzliche Kondensatoren zum Schwingkreis parallelschalten, eingesteckt und der in der Spule steckende Eisenkern verdreht werden (Veränderung der Induktivität). Dies bedeutet nichts anderes als das „Abstimmen des Radios auf einen Sender".

Bevor wir mit dem Bau eines Empfängers beginnen, sei darauf hingewiesen: Rundfunkgeräte dürfen nur bereitgehalten werden, wenn sie ordnungsgemäß angemeldet sind.

12.9 Wir bauen ein Mittelwellenradio

Das Herz unseres Empfängers ist der Schwingkreis auf dem Mittelwellen-Modul (Bild 132), das aus einer Spule (oder besser gesagt: einer „Doppelspule") mit Eisenkern und verschiedenen Kondensatoren besteht. Die Senderwahl erfolgt zunächst grob, indem auf der Steckplatte durch Drahtbrücken verschiedene Kondensatoren – einzeln oder parallelgeschaltet – in den

Bild 132. Das KOSMOS Mittelwellenmodul

Bild 133. Aufbau zu Schaltung 134

Schwingkreis eingefügt werden, gegebenenfalls kann sodann eine Feinabstimmung durch Verdrehen des Eisenkerns (mit einem kleinen Schraubenzieher) vorgenommen werden. Aber Vorsicht: niemals Gewalt anwenden, der Kern könnte sonst beschädigt werden; er läßt sich nur zwei Umdrehungen rauf- oder runterschrauben.

Bevor wir uns an den Aufbau des Empfängers nach Bild 133 machen, noch rasch ein Wort zu der erwähnten „Doppelspule“: Es hat sich insbesondere bei zwei oder mehreren gleichstark einfallenden Sendern als günstig erwiesen, Antenne und Erde nicht direkt an den Schwingkreis, sondern an eine davon elektrisch getrennte, jedoch über den Eisenkern wie bei einem Transformator gekoppelte zweite Spule anzuschließen (bessere Trennschärfe).

Und noch eine Zwischenbemerkung:
Für diese Radioschaltung wird die gestrichelt gezeichnete Drahtbrücke x zwischen Steck-

Bild 134. Mittelwellenradio nach dem Audionprinzip

feder 26 und 27 in Aufbaubild 133 eingesteckt; der Fototransistor T_F wird erst in Kapitel 14.20 benötigt.
Inbetriebnahme des Mittelwellen-Radios:
Aufbau genauestens kontrollieren und Strom einschalten (langes Drahtstück S einstecken). Antenne und Erde anschließen. Lautstärkeregler P_1 ganz nach rechts drehen. P_2 feinfühlig verdrehen, bis ein leises Rauschen hörbar wird. Nun wie oben beschrieben Sender einstellen: Mit Hilfe der Drahtbrücken x_1 und/oder x_2 werden verschiedene Kondensatoren des Moduls angeschlossen, eventuell Feinabstimmung mit dem verdrehbaren Eisenkern.

12.10 Modulation und Demodulation

Wenn es auch schon schwer vorstellbar ist, daß wir – ohne sie sehen, riechen oder hören zu können – ständig von elektromagnetischen Wellen umgeben sind, so grenzt es für uns schon an Wunder, daß diese Wellen auch noch Informationen (z.B. Sprache und Musik, die ja auch wiederum aus Schwingungen besteht) durch den Äther transportieren.
Es ist aber gar nicht so schwer zu verstehen, wenn man folgende Überlegung mitverfolgt:
Nehmen wir an, eine Sendestation hat gerade „Schaltpause"; dann wird die HF-Schwingung zwar abgestrahlt, eine Übertragung von Sprache und Musik findet jedoch nicht statt. Man sagt, daß der Sender in diesem Falle nur die **Trägerfrequenz** ausstrahlt. Wenn sich in den Programmzeitschriften Angaben über Sendefrequenzen der Rundfunkanstalten finden, dann ist damit stets die Trägerfrequenz gemeint.

Ihr seltsamer Name rührt daher, daß sie – wenn die Schaltpause vorüber ist und der Nachrichtensprecher das Wort ergreift – seine Information gewissermaßen „huckepack" mitnimmt und zu einem Rundfunkempfänger „trägt". Den Vorgang, einer Trägerfrequenz zusätzlich Informationen mit auf die Reise zu geben, nennt man *Modulation*. Modulieren heißt, daß man die Trägerfrequenz in einer Weise leicht verändert, so daß die erzielten Veränderungen der Lautstärke und der Tonhöhe der Nachricht (Sprache, Musik, Geräusch) exakt entsprechen.
Beim Rundfunk haben sich zwei grundsätzlich verschiedene Modulationsarten durchgesetzt: **Amplituden**- und **Frequenzmodulation**.

12.11 Amplitudenmodulation (AM)

Das Prinzip ist denkbar einfach: die Amplitude der Trägerfrequenz wird im Takt der Niederfrequenz (also Sprache, Musik usw.) leicht verändert. Abbildung 136 zeigt die reine Trägerfrequenz, die keinerlei Informationen enthält („Schaltpause"). Alle Amplituden dieser Trägerfrequenz sind daher gleich hoch.

Bild 136. Hochfrequenz- (HF-) Schwingung

Bild 137. Amplitudenmodulierte Hochfrequenz

Bild 135. Niederfrequenz- (NF-) Schwingung

Anders sehen die Dinge nun in Abbildung 137 aus: Hier beschreiben die Amplitudenspitzen (und zwar die oberen und unteren gleichzeitig) eine Wellenlinie, und diese Wellenlinie entspricht nun Punkt für Punkt der Niederfrequenz aus Bild 135, die zum direkten Vergleich darunter abgebildet ist. Man kann sich vereinfacht vorstellen, daß die Empfangsstärke am Rundfunkgerät ständig ganz, ganz leicht im Rhythmus der Niederfrequenz schwankt – denn Amplitudenhöhe heißt ja eigentlich Empfangsstärke. Im Radiogerät muß nun dafür gesorgt werden, daß diese feinen Schwankungen aus der Trägerfrequenz wieder herausgefiltert werden, ein Vorgang, den man *Demodulation* nennt. Das herausgefilterte Signal wird sodann verstärkt und dem Lautsprecher zugeführt.
Die Amplitudenmodulation wird bei Lang-, Mittel- und Kurzwelle angewandt. Leider haben amplitudenmodulierte Wellen für den Radiohörer u.a. einen entscheidenden Nachteil: Sie sind außerordentlich störanfällig. Man kann sich selbst ohne weiteres davon überzeugen, wenn man z.B. einen Mittelwellensender in der Nähe von

Straßenbahn-Oberleitungen oder auch während eines Gewitters hört: Die Empfangsstärke, also die Amplitude der Trägerfrequenz, wird durch die Störungen so stark beeinflußt, daß die übertragene Information oftmals in den Störungen untergeht. Aber natürlich steht dem ein gehöriger Vorteil gegenüber: amplitudenmodulierte Wellen haben eine erstaunliche Reichweite; sie kapitulieren auch nicht gleich vor jeder Bodenunebenheit und sind auch noch jenseits eines Wolkenkratzers zu empfangen.

12.12 Das Audion – ein Zauberwort für alte Hasen

Die Schaltungen aus den Anfängen der Rundfunktechnik waren durch besondere Originalität gekennzeichnet, denn es galt, mit möglichst einfachen, zum Teil selbst hergestellten Mitteln das Letzte aus dem kleinen Gerät herauszuholen – schon deshalb, weil die Rundfunksender bei weitem nicht mit so riesigen Sendeleistungen, wie sie heute üblich sind, aufwarten konnten.
Eine Möglichkeit, die eingefangene Hochfrequenz zu demodulieren und das Ergebnis (also die Niederfrequenz) gleichzeitig zu verstärken, bietet das sog. *Audion*. In dem berühmten und als „Göbbelsschnauze" berüchtigten Volksempfänger fand das Audionprinzip Anwendung, und auch noch in den Nachkriegsempfängern griff man aus Sparsamkeitsgründen zur Audionschaltung – natürlich gab es damals noch keine Transistoren, da mußten die guten alten Radioröhren herhalten.

Bild 138. Modulierte HF, gleichgerichtet

Das Schaltbild des Transistor-Audions zeigt Bild 134. Transistor T1 hat eine doppelte Funktion: Von der Hochfrequenzschwingung, die über *C*1 an seiner Basis anlangt, schneidet seine Basis-Emitterdiode den unteren Teil ab (Gleichrichtung, siehe Bild 138), *R*1 und *C*2 sorgen wegen ihrer relativ großen Zeitkonstante aber gleichzeitig dafür, daß die HF des verbleibenden oberen Teils unterdrückt wird, so daß durch *R*1 nun ein Strom fließt, der im Rhythmus der Modulation, also der NF schwankt. Damit ist die Demodulation komplett, und die zweite Transistorfunktion kommt zum Tragen: der schwankende Strom durch *R*1 hat einen schwankenden Basisstrom zur Folge, und der wird – wie es sich für einen Transistor gehört – verstärkt und steht am Kollektor zur Verfügung.
Eine zweifellos faszinierende Idee, dieses Audionprinzip, leider jedoch – wie es im praktischen Leben so ist – weist sie einen gehörigen Nachteil auf: Um die hemmenden Auswirkungen der Schwellenspannung der Basis-Emitterdiode zu umgehen, muß mit dem Potentiometer P2 der Arbeitspunkt des Transistors feinfühlig so eingestellt werden, daß auch kleinste Spannungen, in diesem Falle also das äußerst schwache HF-Signal, gleichgerichtet werden können.

Die Leuchtdiode dient übrigens lediglich dazu, den Einstellbereich des Potentiometers auf 1,6V zu begrenzen; das erleichtert das Auffinden des richtigen Arbeitspunktes ganz wesentlich.
Und auf eine weitere Besonderheit muß noch hingewiesen werden. Als Koppelkondensator *C*1 benutzen wir ganz einfach nebeneinanderliegende Steckfedern; sie sind im Aufbaubild 133 leicht grau getönt: Man erkennt, daß zweimal zwei Steckfedern in „Parallelschaltung" den Kondensator *C*1 bilden – ein Trick, der ein bißchen an die Findigkeit der guten alten „Rundfunksteinzeit" erinnert.

12.13 Frequenzmodulation (FM)

Sie findet vorwiegend im UKW-Bereich Anwendung (selbst bei deutschen Radios findet man heute übrigens kaum noch die Bezeichnung UKW auf den Skalen, sondern meist die international übliche Abkürzung FM = Frequency Modulation). Bei der Modulation wird die Trägerfrequenz selbst und nicht ihre Amplitude im Rhythmus des NF-Signals verändert. Wenn also beispielsweise ein UKW-Sender von 100 MHz empfangen wird, so kann die tatsächlich empfangene Senderfrequenz je nach Amplitude des NF-Signals (also der Lautstärke) Werte zwischen 99,910 MHz und 100,090 MHz haben.
Diese Verhältnisse sind in Abbildung 139 und

HF - Träger

Bild 139. Hochfrequenz- (HF-) Schwingung

Bild 140. Frequenzmodulierte Hochfrequenz

140 dargestellt. Abbildung 139 zeigt die unmodulierte Trägerfrequenz, in Abbildung 140 hingegen ist deutlich zu erkennen, daß die Frequenz schwankt, während, wie schon erwähnt, sich die Amplitude bei dieser Modulationsart nicht ändert.

Im Empfangsgerät muß die in den Frequenzschwankungen enthaltene Information, wieder herausgefilter (Demodulation), verstärkt und dem Lautsprecher zugeführt werden.

Frequenzmodulierte Wellen sind wesentlich unempfindlicher gegen Störungen, weil sich Einflüsse auf die HF-Amplitude nicht bemerkbar machen: Die Nachrichteninformation steckt ja in der Sendefrequenz. UKW-Wellen haben jedoch nur eine sehr begrenzte Reichweite, und ein gewöhnliches Haus aus Stein kann für sie – da sie sich fast geradlinig ausbreiten – ein unüberwindliches Hindernis darstellen.

12.14 Bau eines UKW-Empfängers

Eine der Methoden, die in den Frequenzschwankungen verborgene Information (Sprache und Musik) wieder herauszulocken, ist die sogenannte **Flankendemodulation**. Man macht sich dabei die Tatsache zunutze, daß sich – vereinfacht gesprochen – der Widerstand eines Schwingkreises in Abhängigkeit von der an ihn angelegten Frequenz verändert. Frequenzschwankungen haben dann also Widerstandsschwankungen zur Folge, und diese Widerstandsschwankungen kann man wiederum in Spannungs- oder Stromschwankungen verwandeln, verstärken und im Lautsprecher hörbar machen.
Der Schwingkreis des UKW-Empfängers, den wir bauen werden, enthält außer der Spule statt eines Kondensators als modernes Bauelement die *Kapazitätsdiode* Dk. Eine solche Diode hat den großen Vorteil, daß sich ihre Kapazität unter Zurhilfenahme einer Gleichspannung „einstellen" läßt. Diese Einstell-Gleichspannung erhalten wir in Abbilddung 143 am Schleifer des Potentiometers P2, so daß die Senderwahl mit dem Potentiometer vorgenommen werden kann.

12.15 Pendeln mit Methode

Der Aufbau von UKW-Empfängern erfordert eine extrem gedrängte Aufbauweise der Bauelemente, da bereits die Kapazitäten von Leitungsdrähten Einfluß auf die Schaltung haben und u.U. zu einem Mißerfolg führen können; aus diesem Grunde haben wir die wichtigsten Teile – Spule, Kapazitätsdiode, Transistor (es handelt sich hier um einen sog. **Feldeffekttransistor**, der für hohe Frequenzen besonders gut geeignet ist) und Kondensatoren – zu einem Empfängermodul zusammengefaßt. Das gesamte „Radio" befindet sich also auf der kleinen Platine, und von diesem winzigen Empfänger-Baustein sollten wir natürlich keine Wunder erwarten, sondern ihm mit ein bißchen Experimentierfreude zu Leibe rücken.

Bild 141. Das KOSMOS UKW-Modul

Die Schaltung arbeitet nach dem sog. **Pendelprinzip** – ein Verfahren, das zwar an Einfachheit nicht zu überbieten ist, außerdem eine erstaunlich große Empfindlichkeit besitzt, für Industrieanwendungen mit ihren hohen Anforderungen an Bedienungskomfort und Empfangsqualität mittlerweile aber in Vergessenheit geraten ist. Trotzdem wollen wir auf das Grundprinzip des Pendelempfanges kurz eingehen.

Von einem Schwingkreis wissen wir bereits, daß eine von außen angeregte Schwingung wieder abklingt, wenn nicht ständig neue Energie zugeführt wird – beim Colpitts-Oszillator in Kap. 12.6 sorgte der Transistor über ein **Rückkopplungssystem** für eine fortlaufende Energie-Nachlieferung und somit für eine ungedämpfte Schwingung. Je geringer die Verluste eines Schwingkreises sind (oder anders ausgedrückt: je besser der Schwingkreis entdämpft ist), eine desto geringere Energie muß zugeführt werden, um die Schwingung am Laufen zu halten. Bezüglich der Verluste in den Bauteilen läßt sich sicherlich eine Grenze nicht unterschreiten, sollen Spule und Kondensator bezahlbar bleiben. Man hilft sich beim Pendelempfänger daher mit einer List: Der Schwingkreis wird entdämpft, indem eine Rückkopplung in sehr rascher Folge ein- und wieder ausgeschaltet wird. Kurz vor dem Einsetzen der Rückkopplung ist der Schwingkreis fast unendlich gut entdämpft und bietet somit für einfallende Radiowellen ideale Empfangsbedingungen. Sorgt man nun dafür, daß die Ein- und Ausschaltfrequenz der Rückkopplung deutlich oberhalb der Hörgrenze liegt, damit der Hörgenuß nicht beeinträchtigt wird, so erhält man durch den Entdämpfungstrick einen äußerst empfindlichen Empfänger, der je nach Empfangslage u.U. sogar ohne Antenne auskommt.

so wird die Spule L3 aus dem 15-cm-Drahtstück gewickelt.

Bild 142. Aufbau zu Schaltung 143

12.16 Aufbau des UKW-Pendelempfängers

Das Gerät wird nach Bild 142 aufgebaut (Schaltbild 143) und nach einer sorgfältigen Kontrolle zum Schluß die Schalter-Drahtbrücke S eingesteckt. Die Leuchtdioden sollten jetzt leuchten, und aus dem Lautsprecher wird ein leises Rauschen zu hören sein.

Das Potentiometer wird nun ganz langsam verdreht, bis ein Sender hörbar wird. Jetzt beginnt die Feinarbeit für einen optimalen Empfang. Folgende Maßnahmen können ausprobiert werden:

1. Je nach Stärke des einfallenden Senders können für *R*2 die Werte 2,7 kΩ, 33 kΩ oder 100 kΩ versucht werden.
2. Bei Steckfeder 10 kann ein Stückchen Draht als Antenne eingesteckt werden. Die Lage des Antennendrahtes sollte probehalber verändert werden.
3. Steckfeder 78 kann über einen Draht mit einem Wasserhahn oder den metallisch blanken Teilen eines Heizkörpers verbunden werde.
4. Die vorderen beiden Windungen der Spule auf dem UKW-Modul können vorsichtig etwas gespreizt oder zusammengedrückt werden.
5. Das Gerät selbst wird hin- und hergedreht, um die beste Empfangslage zu ermitteln.
6. Der Empfangsbereich kann verändert werden (um z.B. Sender, die ganz am Ende der Skala liegen, noch zu empfangen), indem die hinteren sechs Windungen der Spule vorsichtig etwas gespreizt oder zusammengedrückt werden.
7. Die Windungen der selbstgewickelten Spule werden etwas gespreizt oder zusammengedrückt (nur in Längsrichtung).

Die angeführten Vorschläge können den Empfang verbessern, möglicherweise aber auch verschlechtern. Die günstigsten Bedingungen muß jeder durch geduldiges Probieren selbst herausfinden.

Bild 143. UKW-Empfänger nach dem Pendel-Prinzip

13. NF-Technik: Von Tönen und Geräuschen

Frequenzen, die im hörbaren Bereich liegen, bezeichnet man als Niederfrequenz, abgekürzt NF. Nun ist „hörbar" jedoch ein sehr dehnbarer Begriff, denn Kinderohren vermögen höhere und tiefere Töne besser wahrzunehmen als die Ohren eines Greises, Fledermausohren haben eine andere Empfindlichkeit als die Ohren eines Pferdes. Man hat sich daher darauf verständigt, den Begriff Niederfrequenz dem Frequenzbe-

reich von 16Hz bis 16kHz zuzuordnen – trotz der Proteste einiger HiFi-Freaks, die der Meinung sind, man müsse die obere Grenze mindestens auf 20kHz, möglichst sogar auf 40kHz legen.

13.1 Bewegung erzeugt Schall

Um in den Hörgenuß von elektronisch erzeugter oder verstärkter Musik zu kommen, braucht man einen Schallwandler – oder weniger vornehm ausgedrückt – einen Lautsprecher bzw. Ohrhörer. Bild 144 zeigt einen Schnitt durch einen Lautsprecher: Wir erkennen eine Membran, eine Schwingspule, einen topfförmigen Magneten und den Lautsprecherkorb. Die Spule kann sich über dem runden Innenteil des Magneten hin- und herbewegen und dabei die Membran, mit der sie fest verbunden ist, nach vorn und nach hinten auslenken. Fließt durch die Spule ein Strom, so entwickelt sie eine Magnetkraft, die je nach Stromrichtung der des Lautsprechermagneten entgegensetzt oder gleichgerichtet sein kann. Entsprechend schnellt die Spule etwas heraus oder wird nach hinten gezogen. Schwankt der Spulenstrom (z.B. im Takte einer Musik), so führt die Spule und damit auch die Membran entsprechende Bewegungen aus und erzeugt Luftschwingungen, die unser Ohr als Töne empfindet.

13. 2 Ein Hörfähigkeitstester (Audiometer)

Starten wir einen Versuch mit unseren eigenen Ohren. Nach Bild 145 bauen wir einen Hörfähigkeitstester auf (Schaltbild 146), der von Leuten mit höherer Bildung fachgerecht als Audiometer bezeichnet wird. Geprüft wird die Hörfähigkeit für hohe und höchste Töne – für niedrige Frequenzen ist unsere Apparatur nicht geeignet.

P1 wird zunächst ganz nach links gedreht und das Gerät durch Einstecken der Drahtbrücke S eingeschaltet. Es wird jetzt ein Ton hörbar sein, der uns bereits ziemlich hoch vorkommt. Dreht man nun das Poti ganz langsam nach rechts, so wird die Tonhöhe steigen, bis wir den Eindruck haben, daß nichts mehr zu hören ist. Auf der Skala kann nun in etwa die Hörgrenze abgelesen werden: „0“ entspricht 2,5kHz, „2“ entspricht 3kHz, „4“ entspricht 4,5kHz, „5“ entspricht 10kHz, und bei knapp über „5“ (5,3) erreichen wir 15kHz. Wegen der unvermeidbaren Bauteiletoleranzen kann es sich dabei allerdings nur um Anhaltswerte handeln, von einem amtlich eichfähigen Audiometer ist unser Gerät weit entfernt.

Bild 144. Aufbau eines Lautsprechers

Bild 146. Audiometer

Bild 145. Aufbau zu Schaltung 146

13.3 Vordertür und Hintertür – Verstärker mit zwei Eingängen

Wenn wir das Blockschaltbild des Verstärkermoduls anschauen (Bild 147), so stellen wir mit einiger Verblüffung fest, daß es zwei Eingänge besitzt, obwohl man ja wohl meinen müßte, daß zur Verstärkung eines Signals (Sprache, Musik, Geräusche) ein einziger Eingang (gegenüber der Masse) vollkommen ausreichend sei. Die Integrierte Schaltung des Verstärkermoduls hat in ihrem Innern einen sog. Eingangs-Differenzverstärker, und von den Eigenschaften solcher Differenzverstärker soll nun die Rede sein.

Bild 147. Das KOSMOS Verstärker-Modul

13.4 Fehlerklau: Der Differenzverstärker

Man stelle sich einen Transistor vor, der unter der Hitze des Sommers leidet: Er reagiert darauf, indem er seine Basis-Emitterspannung erniedrigt (2..3mV pro Grad Celsius). Dies wiederum nimmt der Arbeitspunkt der Schaltung übel; er verschiebt sich und öffnet Verzerrungen Tür und Tor. Da Elektroniker aber gefälligst für unverzerrte Musik zu sorgen haben, mußten sie sich etwas Pfiffiges einfallen lassen: Sie entsannen sich der alten Physiker-List, daß man einen Fehler zweimal auftreten läßt und dann die Differenz bildet, so daß der Fehler herausfällt.
Genau dies passiert bei einem (idealen) **Differenzverstärker**: Man spendiert zwei statt nur eines Transistors, sorgt dafür, daß beide denselben Temperaturfehler haben, bildet die Differenz der Eingangssignale – und siehe da: Der Temperaturfehler ist wie weggezaubert!

Bild 148. Aufbau zu Schaltung 149

13.5 Kleiner – größer – gleich?

Bild 149 zeigt die Schaltung eines Differenzverstärkers. Der linke Eingang (Basis des linken Transistors) liegt über einen festen Spannungsteiler auf etwa 4,5V – dem rechten Eingang hingegen wird die zwischen 0V und +9V einstellbare Spannung vom Potischleifer zugeführt. Stellt man das Poti auf Mitte (4,5V am Potischleifer), so ist die Differenz der Eingangspannungen gleich Null, die Differenz der Ausgangsspannungen, die man zwischen den beiden Kollektoren durch zwei antiparallel geschaltete Leuchtdioden mißt, ist ebenfalls null (beide LEDs dunkel). Dreht man nun den Potischleifer hin und her (Eingangsspannungs-Differenz wird ver-

Bild 149. Differenzverstärker

schieden von Null), so geht die eine oder andere Leuchtdiode an, weil die Differenz natürlich positiv oder negativ werden kann. Mit dem Aufbau nach Bild 148 läßt sich dieses Verhalten sehr deutlich beobachten. Es läßt sich also feststellen, ob die Spannung am rechten Verstärker-Eingang größer, kleiner oder gleich 4,5V ist.

Ohne mühselige mathematische Ableitungen kann man erkennen, daß der gemeinsame Emitter-Widerstand (in unserem Fall eine Reihenschaltung aus 150 und 100Ω) der Schaltung ihre Eigenschaften verleiht: Steigende Spannung am Potischleifer bedeutet einen wachsenden Basisstrom in T2, der natürlich auch einen größeren Kollektor-Emitterstrom zur Folge hat. Nach dem Ohmschen Gesetz wird dadurch der Spannungsabfall am Emitterwiderstand höher, so daß der linke Transistor T1 weniger leitend wird, da seine Basis ja mit dem unveränderlichen Spannungsteiler verbunden ist. Die angestellte Überlegung gilt umgekehrt natürlich auch für den Fall, daß die Schleiferspannung von P1 sinkt.

13.6 Wie voll ist der Kondensator?

Informiert sein ist bekanntlich alles. Die Schaltung nach Bild 151 gibt uns Informationen über die Ladevorgänge am Kondensator. LED1 brennt: Kondensator weniger als halbvoll; beide LEDs dunkel: Kondensator halbvoll; LED2 brennt: Kondensator mehr als halbvoll. An dem Aufbau nach Bild 150 wird die Taste

Bild 151. Welchen Ladezustand hat der Kondensator?

Bild 150. Aufbau zu Schaltung 151

Bild 152. Aufbau zu Schaltung 153

Bild 153. Ein hochempfindlicher Vergleicher

gedrückt und unten gehalten. Nach einer gewissen Zeit geht LED1 aus; nach einer weiteren Zeitdauer geht LED2 an. Wird die Taste nun wieder losgelassen, so kann man den Entladevorgang entprechend mitverfolgen.

13.7 Hochempfindlicher Vergleicher

Wir haben gesehen, daß der Differenzverstärker nicht nur zwei Eingänge, sondern auch zwei Ausgänge hat. Was macht man mit zwei Ausgängen? Wir erinnern uns an unser Verstärkermodul, das – wie der Zufall so spielt! – zwei Eingänge hat und verbinden die Ausgänge des Differenzverstärkers mit den beiden Eingängen des Verstärkermoduls. Die Schaltung in Bild 153 stellt nun, da sie aus zwei Verstärkereinheiten besteht, einen außerordentlich empfindlichen Vergleicher für „kleiner – gleich – größer" dar (Aufbaubild 152). Selbst geringste Veränderungen der Potistellung haben sofort Auswirkungen auf die beiden Leuchtdioden am Ausgang (daß hier nur noch ein einziger Ausgang zur Verfügung steht, liegt in einem Schaltungskniff im Innern der Integrierten Schaltung begründet).

13.8 Swinging Differenzverstärker

Wir erinnern uns: gleich zu Beginn dieses Experimentierbuches haben wir eine Blinkschaltung mit dem Verstärkermodul aufgebaut, ohne auch nur den leisesten Schimmer zu haben, welche

Geheimnisse das kleine scharze Kästchen, der IC, in sich birgt. Der Schleier wurde inzwischen ein wenig gelüftet: zumindest kann man jetzt (richtig) vermuten, daß seine zwei Eingänge auf einen Differenzverstärker im Innern führen. Mit diesem Wissen können wir uns einen Überblick über die Blinkfunktion verschaffen; Schaltung 155 (Aufbaubild 154) führt uns auf den richtigen Weg. Die beiden Transistoren im linken Teil sind zu dem nun schon hinlänglich bekannten Differenzverstärker verschaltet; an seinen rechten Eingang (Basis von T2) ist ein Elko angeschlossen, der über den Widerstand *R*8 auf- und entladen werden kann. Den Strom zum Aufladen liefert der Ausgang des Verstärkermoduls, der sich zunächst auf +9V befindet, wenn wir über die Schalterbrücke S die Batteriespannung an die Schaltung legen. Was jetzt passiert, konnten wir bei den vorhergehenden Versuchen bereits genauestens studieren: hat die Kondensator-Ladespannung etwa +4,5V erreicht (das kann nach dem ersten Einschalten ziemlich lange dauern), so wechselt der Ausgang des Verstärker-Moduls von +9V auf etwa 0V. Der Kondensator erhält keinen Ladestrom mehr, im Gegenteil, über *R*8 entlädt er sich nun. Das geht so lange gut, bis die Spannung am Plusanschluß des Kondensators auf einen Wert unter 4,5V abgesunken ist. Unser feinfühliger Vergleicher reagiert prompt, und der Ausgang des Verstärkermoduls springt wieder auf +9V; die ganze Geschichte fängt nun wieder von vorn an.
Experimentieranregung:
Die Blinkfrenquenz hängt von *R*8 und *C*1 ab. Für *R*8 können die Werte 3,3kΩ , 100kΩ und 220kΩ und für *C*1 100µF und 470µF beliebig miteinander kombiniert werden.

Bild 154. Aufbau zu Schaltung 155

Bild 155.
Aus dem Vergleicher wird eine Schwingschaltung

13.9 Differenzverstärker – und was nun?

Der achtbeinige Integrierte Schaltkreis des Verstärkermoduls enthält natürlich außer dem Differenzverstärker noch jede Menge anderer Schaltungsteile, für deren Verständnis uns jedoch im Moment noch die Voraussetzungen fehlen. Das soll uns aber nicht weiter bekümmern, wichtig ist, daß wir diesen faszinierenden Baustein für die verücktesten Verstärker- und Nichtverstärker-Anwendungen einsetzen können.

Bild 156. Die Größe von *R*x bestimmt den Verstärkungsfaktor

Für Verstärker-Anwendungen merken wir uns folgendes: die zu verstärkende Spannung wird an den Eingang „E" angelegt; der Eingang „V" dient zur Einstellung des Verstärkungsfaktors. Ist er „offen", also unbeschaltet, so erhält man den Verstärkungsfaktor eins. Wird er über einen Kondensator mit dem Minuspol der Batterie verbunden, so beträgt die Verstärkung etwa fünftausend. Alle zwischen eins und fünftausend liegenden Verstärkungswerte können eingestellt werden, indem in Reihe mit dem Kondensator ein Widerstand *R*x geschaltet wird – je kleiner dieser Widerstand, desto höher die Verstärkung (Bild 156).
Was man mit den beiden Eingängen sonst noch anfangen kann, und wie sich der Ausgang verhält, haben wir in Tabelle 5 zusammengefaßt; für die nachfolgende kleine Schaltungssammlung kann sie durchaus von Nutzen sein.

E	V	A
offen	offen	$U_{A\ max.}$
0 Volt	offen	$U_{Batt./2}$
0 V . . . $U_{Batt.}$	offen	$U_{Batt./2}$ . . . $U_{A\ max.}$
0 V . . . $U_{Batt.}$	0 V	$U_{A\ max.}$
0 V . . . $U_{Batt.}$	0 V . . . $U_{Batt.}$	$U_{A\ max.}$ (E = V)
offen	0 V . . . $U_{Batt.}$	$U_{A\ max.}$
$U_{Batt.}$	0 V . . . $U_{Batt.}$	$U_{A\ max.}$
0 V . . . $U_{Batt.}$	$U_{Batt.}$	$U_{A\ max.}$ wenn $E > U_{Batt.\ -1\ V}$ 0 V wenn $E < U_{Batt.\ -1\ V}$

$U_{A\ max.} \approx U_{Batt.\ -1,3\ V}$

Tabelle 5: Ausgangsverhalten des Verstärkermoduls bei verschiedenen Eingangs-Beschaltungen.

13.10 Taktvoll: ein Metronom

Es soll nun das Versprechen eingelöst werden, ein Metronom mit einstellbarem Takt aufzubauen (Schaltbild 158). Sowie in Aufbau 157 die Schalterbrücke S eingesteckt wird, beginnt das Gerät vernehmlich, Taktschläge anzugeben. Man sollte das Poti jetzt ganz nach links drehen und beim langsamen Takt wie ein Musikprofi mitzählen „... eins und... eins und... eins und...". Die Geschwindigkeit des Taktes kann durch Rechtsdrehung des Potiknopfes gesteigert werden.
Experimentieranregungen:
Aus dem Metronom wird im Handumdrehen ein Motorrad-Simulator, wenn man für *C*1 einen Wert von 10µF einsetzt. Jetzt kann man mit dem Poti so richtig „Gas geben"!
Eine ohrenbeleidigende „handgesteuerte" Sirene ergibt sich, wenn für *C*1 ein 0,1-µF-Kondensator (=100nF) eingesteckt wird. Man dreht am Poti nach Herzenslust hin und her und erzeugt Geräusche, die die Nachbarn auf die Palme bringen.- Im folgenden Kapitel werden wir diese Sirene auch noch automatisieren, so daß die „Handarbeit" wegfällt.

13.11 Kojak läßt grüßen – eine vollautomatische Sirene

Schaltbild 160 sieht auf den ersten Blick kompliziert aus, beim näheren Hinschauen allerdings entdeckt man, daß hier lediglich zwei bereits bestens bekannte Grundschaltungen zum Einsatz kommen: links ein aus zwei Transistoren

Bild 157. Aufbau zu Schaltung 158

Bild 159. Aufbau zu Schaltung 160

Bild 158. Metronom

Bild 160. Kojak-Sirene

aufgebauter und rechts ein mit dem Verstärkermodul realisierter astabiler Multivibrator. Beide sind über eine Diode und die beiden Widerstände *R*5 und *R*6 miteinander gekoppelt; oder besser ausgedrückt: der langsamere linke Multivibrator schaltet periodisch die Tonhöhe des rechten um. Mit dem Potentiometer P1 kann die Grundtonhöhe eingestellt werden (Aufbaubild 159).

Experimentieranregungen:

Der im Schaltbild gestrichelt eingezeichnete Kondensator *C*3 wird zusätzlich eingesteckt.

Kondensator *C*1 wird durch einen Wert von 100µF ersetzt.

Die Diode wird herumgedreht, so daß ihre Katode zum Kollektor des Transistors T2 weist.

Der als *C*3 verwendete 0,1µF-Kondensator (=100nF) wird wieder herausgezogen und parallel zu *C*4 geschaltet.

Durch Kombinationen der genannten Anregungen ergeben sich wieder neue Klangeffekte – man sollte so lange experimentieren, bis man glaubt, den Original-Kojakton gefunden zu haben.

13.12 Elektronik-Harfe

Schaltbild 162 zeigt ein Instrument, das nicht gerade für musikalisch anspruchsvolle Gemüter gedacht ist, weil die Bauteile-Toleranzen und die nach der Norm vorgegebenen Widerstandsabstufungen eigentlich das Abstimmen jedes einzelnen Tones mit einem Potentiometer erfordern würden. Wir wollen aber nicht kleinlicher sein, als es nottut, sondern nehmen den „Spieldraht" und fahren damit rasch über die „Harfensaiten" (in Aufbaubild 161 grau markierten Steckfedern) hinweg. Die Stellung von P1 hat Einfluß auf die

Bild 162. Elektronische „Harfe"

Bild 161. Aufbau zu Schaltung 162

Bild 163. Aufbau zu Schaltung 164

Grundtonhöhe, aber auch auf die Zuordnung der Töne zueinander.

13.13 Perkussion – das Zauberwort für Klaviere

Unter Perkussionseffekt versteht man den Klang, der entsteht, wenn ein Hämmerchen auf eine Saite schlägt und mit einem (fast unnachahmlichen) Nachhall einen definierten Ton erzeugt.
Eine kleine Vorstellung davon gibt uns unser „elektronisches Klavier" nach Bild 164 (Aufbau 163), das zumindest den Nachhall in etwa

Bild 164. Elektronisches „Klavier" mit Perkussionseffekt

imitiert, wenn Taster Ta1 gedrückt wird. Die Tonhöhe des „Klavieres" kann mit dem Potentiometer P1 vorgewählt werden, eine Umschaltung des Grundtons erfolgt mit Taster Ta2. Für das allmähliche Abklingen der Töne sind die Kondensatoren *C*1, *C*2 und *C*3 verantwortlich.

Es darf gespielt werden....

13.14 Getrennte Wege für hohe und tiefe Töne: Zweikanal-Lichtorgel

Bei den tollen Lichteffekten in Diskotheken mag manch einem Hören und Sehen vergehen. Wir wollen die Angelegenheit nüchtern betrachten und versuchen, dahinter zu kommen, wieso bei hohen Tönen andere Lampen aufleuchten als bei tiefen.

Das Geheimnis wird durch die Schaltung 166 ein gutes Stück gelüftet. Sie enthält zwei Netzwerke aus Widerständen und Kondensatoren (im Schaltbild 166 grau unterlegt), von denen das mit H bezeichnete vorwiegend die hohen und das mit T bezeichnete vorwiegend die tiefen Töne passieren läßt. Die Funktion eines solchen Netzwerkes, das auch *Filter* genannt wird, beruht zum einen darauf, daß der „Wechselstromwiderstand" eines Kondensators mit steigender Frequenz (höhere Töne) sinkt. Zum anderen beruht sie auf den Zeitkonstanten im Zusammenspiel von Kondensatoren und Widerständen. Mit solchen Filtern kann man also aus einem Frequenzgemisch (und das ist ja jede Musikdarbietung) unterschiedliche Frequenzen herausfiltern.

Bild 165. Aufbau zu Schaltung 166

Bild 166. Zweikanal-Lichtorgel

Verbindet man an den Eingang E von Aufbau 165 mit dem Diodenausgang eines Cassettenrecorders oder aber mit dem Lautsprecherausgang eines Transistorradios, so flackern die beiden Leuchtdioden je nach Anteil von hohen und tiefen Tönen höchst unterschiedlich.

13.15 Tiefe Töne – hohe Reichweiten

Seeleute sind nicht so leicht aus der Fassung zu bringen und schon gar nicht durch eine Alarmsirene, wie sie z.B. die Feuerwehr zu Lande benutzt. Trotzdem geben Schiffe stets Warntöne ab, die besonders tief klingen. Des Rätsels

Bild 168. Schiffssirene

Lösung: Tiefe Töne haben bei ungehinderter Ausbreitung (und das pflegt auf dem Meer der Fall zu sein) eine wesentlich größere Reichweite als hohe.
Eine Schiffssirene, die wir vielleicht in ein Modellboot einbauen können, wird nach Bild 167 aufgebaut (Schaltung 168). Ein Druck auf den Taster, und der Lautsprecher „röhrt" einen markerschütternden tiefen Ton heraus.

Bild 167. Aufbau zu Schaltung 168

13.16 Entzerrte Schallplatten-Wiedergabe

Beim Schneiden einer Schallplatte treten Probleme auf, die in den mechanischen Gegebenheiten des Schneidapparates und des Plattenmaterials liegen. Wir können hier im Rahmen dieses Experimentierbuches nicht auf Einzelheiten eingehen, so viel sei aber angemerkt: Um der mechanischen Probleme bei der Aufnahme Herr zu werden, wird durch entsprechende Filter der Frequenzgang der Musik eingeengt, also absichtlich verzerrt. Man muß nun bei der Wiedergabe der Schallplatte das Gegenteil tun, nämlich wieder entzerren.
Einen Schallplatten-Verstärker mit Entzerrung zeigt Schaltbild 170. Er wird nach Bild 169 aufgebaut, an seinen Eingang E kann ein Plattenspieler mit einem magnetischen System angeschlossen werden. Man sollte jedoch bedenken: der kleine Lautsprecher, den wir hier verwenden, kann selbstverständlich keine Lautsprecherbox ersetzen!

Bild 169. Aufbau zu Schaltung 170

Bild 170. Plattenspieler-Entzerrerverstärker

Bild 171. Aufbau zu Schaltung 172

Bild 172. Meeresrauschen und Schlagzeug

13.17 Rauschende Erfolge...

im wahrsten Sinne des Wortes kann man mit einer gewöhnlichen Germanium-Diode erzielen, wenn man sie ausnahmsweise in Sperrichtung an unsere 9V-Spannungsversorgung anschließt: die zulässige Sperrspannung dieser Diode wird dann überschritten, und sie „bricht durch", d.h. es fließt auch in Sperrichtung ein gehöriger Strom. Man kann allerdings durch einen entsprechend hohen Vorwiderstand dafür sorgen, daß dieser „Durchbruch" keine bleibenden Schäden verursacht und zugleich einen hübschen Effekt ausnutzen, den uns dieser Durchbruchstrom beschert: Es findet dabei eine höchst ungleichmäßige Elektronenwanderung statt (statistische Verteilung, mehr darüber siehe Kapitel 21.16), deren Unregelmäßigkeiten man verstärken und im Lautsprecher dann als sog. **Rauschen** hören kann.

Den sonst bei Hifi-Freunden nicht gerade besonders beliebten Rauscheffekt wollen wir gezielt ausnutzen und einen Rauschgenerator nach Bild 171 aufbauen (Schaltbild 172 – die in Aufbaubild 171 gestrichelt eingezeichnete Drahtbrücke x2 wird zunächst nicht eingesteckt).

Das Potentiometer P2 wird bei gedrücktem Taster Ta2 so eingestellt, daß ein kräftiges Rauschen zu hören ist. Durch rhythmisches Drücken von Taster Ta2 kann jetzt erreicht werden, daß das Rauschen wie Geräusche einer Meeresbrandung an- und abschwellen.

13.18 Schlagzeug-Geräusche aus der Germanium-Diode

Auch den Sound eines Schlagbesens kann uns eine Germaniumdiode in Sperrichtung simulieren. Dazu werden in Aufbaubild 171 folgende Umbauten vorgenommen: Drahtbrücke x1 wird herausgezogen, Drahtbrücke x2 wird eingesteckt.
Drücken von Ta1 erzeugt jetzt ein Geräusch, das einem Schlagzeug sehr nahe kommt.

13.19 Elektronik-Roulette „Zahl oder Adler"

Wir sollten uns jetzt etwas entspannen und ein kleines Spielchen wagen – in alle Spielhöllen der Welt hat die Elektronik ja längst Einzug gehalten. Wenn wir bei unserem Aufbau (Bild 173, Schaltbild 174) den Taster drücken, leuchten beide Leuchtdioden mit verminderter Helligkeit: sie werden in rascher Folge ein- und ausgeschaltet, so daß das Auge nur noch ein Flimmern wahrnimmt. Jetzt wird der Taster losgelassen: Eine LED bleibt brennen. Ist es die linke? Ist es die rechte? Niemand kann das vorhersagen. Vereinbaren wir mit einem Spielpartner, welche LED-Diode „Zahl" und welche „Adler" darstellen soll, so kann eine tolle Knobelei losgehen.
Der linke Teil der Schaltung mit dem Verstärkermodul ist ein astabiler Multivibrator, der mit etwa zehn Impulsen pro Sekunde den rechten Teil, das spezielle Flipflop aus Kap. 11.5, hin- und herschaltet. Bei dieser Frequenz, die weit über unserer Reaktionsgeschwindigkeit liegt, ist ein „Mogeln" völlig ausgeschlossen.

Bild 173. Aufbau zu Schaltung 174

Bild 174. Elektronisches Roulette „Zahl oder Adler"

13.20 Babysitten mit Elektronik

Elektronik soll den Menschen das Leben erleichtern. Wie wär's also mit einer Lauschanlage, die den Eltern jederzeit Klarheit darüber verschafft, was im Kinderzimmer vor sich geht? Unser Gerät (Aufbaubild 175) wird neben dem Babybettchen aufgestellt (der Lautsprecher dient als Mikrofon), der Ohrhörer wird über zwei lange Drähte angeschlossen (vielleicht ist auch ein zweiter Lautsprecher zur Hand?), und die Eltern können beruhigt in ihrem Zimmer sitzen, ohne das Kleine „aus den Ohren" zu verlieren. Zum Ausprobieren kann der Ohrhörer natürlich direkt angeschlossen werden.

Schaltbild 176 zeigt, daß die Lauschanlage aus zwei Transistor-Vorverstärkern und dem Verstärkermodul als Endverstärker besteht. Die gewünschte Empfindlichkeit kann mit P1 eingestellt werden. Sollte sich ein starker Rundfunksender in der Nähe befinden, so kann es durchaus passieren, daß wir ungewollt das Abendprogramm mithören müssen. Abhilfe schafft hier nur eine „Abschirmung", also der Einbau in ein Blechkästchen, das wir mit der Masse, dem Minuspol der Batterie, leitend verbinden müssen.

Experimentieranregung:

Die Anlage ist so empfindlich, daß wir mutwillig die sonst so verpönte „akustische Rückkopplung" produzieren können: der Ohrhörer wird mit der kleinen Öffnung nach unten über den Lautsprecher gehalten. Sofort ertönt ein unangenehmer Pfeifton!

NICHT VERGESSEN: 100nF=0,1µF !

Bild 175. Aufbau zu Schaltung 176

Bild 176. Elektronische Babysitter-Lauschanlage

13.21 Verstärker als Monoflop und Flipflop

Es kann nicht von der Hand gewiesen werden, daß Elektroniker besonders ideenreiche Leute sind. Ihre Stärke liegt darin, unkonventionelle Wege zu gehen und Bauteile und Baugruppen ganz anders einzusetzen, als es sich der Fabrikant ursprünglich vorgestellt hat. Das beste Beispiel hierfür ist das Verstärkermodul, das – wenn man ein bißchen nachdenkt – durchaus auch als astabiler, als bistabiler und als monostabiler Multivibrator eingesetzt werden kann. Die „astabile Zweckentfremdung" ist uns bereits geläufig, bleibt uns also noch, die beiden anderen genannten Anwendungen zu studieren.

Bild 178. Verstärkermodul als Flipflop

Bild 178 zeigt die Schaltung eines Flipflops mit Setz- und Rücksetz-Taste (Aufbaubild 177). Es wurde in Kap. 11.19 für den Geräusch-Schalter bereits einmal eingesetzt. Mit den Informationen aus Tabelle 5 sollte das Verständnis keine großen Schwierigkeiten bereiten.

Wie das Verstärkermodul auch zu einem Monoflop umfunktioniert werden kann, geht aus Bild 180 hervor (Aufbaubild 179). Die Monozeit ist von *R*3 und *C*2 abhängig.

Experimentieranregung:

Für *R*3 und *C*2 können die unterschiedlichsten Werte ausprobiert werden, die Monozeit ist dadurch in einem sehr weiten Bereich einstellbar.

Bild 177. Aufbau zu Schaltung 178

Bild 179. Aufbau zu Schaltung 180

Bild 180. Verstärkermodul als Monoflop

14. Opto-Elektronik

14.1 Das kalte Licht

Im Gegensatz zu den uns allen bekannten Faden-Glühlampen, bei denen Licht über den Umweg einer Höllen-Temperatur (2000 Grad Celsius und mehr) erzeugt wird, arbeiten lichterzeugende Halbleiter bei absolut irdischen Temperaturen – im Normalbetrieb liegen sie nur wenig über Raumtemperatur.

14.2 Wandlung von Energie

Licht ist eine Form von Energie, und bekanntlich kann eine Energieform in eine andere umgewandelt werden: potentielle in kinetische Energie, mechanische in Wärmeenergie (Reibungswärme), Wärme- in elektrische Energie (Thermo-Element), chemische in elektrische Energie (Batterie), magnetische in elektrische Energie usw. Abhanden kommt Energie niemals, sie tritt nur in unterschiedlichen Formen auf.

14.3 Höhenflug eines Elektrons

So wie ein Stein, den man aufs Dach befördert hat, eine potentielle Energie besitzt und diese dann beim Herunterfallen in deutlich sichtbare kinetische Energie umsetzt, kann auch ein Elektron durch Zuführung von Energie – z.B. durch Anlegen eines elektrischen Feldes – auf ein „höheres Niveau" angehoben werden. Beim „Herabfallen" wird wieder Energie frei, z.B. in Form von sichtbarem oder im Infrarot-Bereich liegendem Licht.
Auf dieser Energie-Hin-und-Herwandlung beruht die Wirkung einer Leuchtdiode und auch einer Infrarotdiode (LED steht übrigens für den englischen Begriff **L**ight **E**mitting **D**iode = lichtaussendende Diode).
Vereinfacht kann man sich vorstellen, daß ein „Lichtquant" immer dann ausgesendet wird, wenn ein Elektron in ein Loch fällt (Bild 181). Die Farbe des Lichtes, also seine Wellenlänge, hängt von der Art der für den Halbleiter verwendeten Grundmaterialien ab: Gallium-Arsenid-Phosphid ist für rote Leuchtdioden und Gallium-Arsenid für Infrarotdioden üblich.

Bild 181. Die „Rekombination" eines Elektrons mit einem Loch erzeugt ein Lichtquant ($h \cdot \nu$)

14.4 Lichtempfänger

Infrarotstrahlen können vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden, ihre Wellenlänge liegt außerhalb des sichtbaren Bereiches (siehe Tabelle 6). Für elektronische Empfänger indessen stellt dies gar kein Problem dar: der Fototransistor, den wir in den folgenden Versuchen einsetzen werden, ist im Infrarotbereich sogar besonders empfindlich. Der Mechanismus der Energiewandlung findet beim Fototransistor in umgekehrter Richtung statt: auf die Basisschicht einfallendes Licht reißt Elektronen aus ihren Stammplätzen heraus, übrig bleiben Löcher und freie Elektronen (Bild 182), welche sich nun zu einem Basisstrom vereinen und – wie beim normalen Transistor – einen verstärkten Kollektor-Emitterstrom bewirken.

Bild 182. Die einfallende Lichtenergie setzt Ladungsträger frei.

Wellenlänge	3	$0{,}3$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Frequenz	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}
Infrarot - Strahlen (10^{6} nm λ … 770 nm λ)		extrem weit	weit	mittel	nah	
Mikrowellen					sichtbares Licht	
					rot	

Tabelle 6: Wellenlänge der Infrarot-Strahlen

14.5 Licht steuert Strom

Schauen wir uns den Fototransistor an (welches Bauelement der Fototransistor und welches die IR-Diode ist, sollte aus Kap. 11.9 bereits bekannt sein): er hat nur zwei (!) Anschlußbeine, von der Basis ist keines herausgeführt, denn die soll ja durch Licht aktiviert werden.

Eine erste kleine Prüfschaltung (Schaltbild 184, Aufbaubild 183) soll uns mit der Funktion des Fototransistors vertraut machen: Zur Anzeige, ob ein Strom fließt, ist in die Kollektorleitung eine Leuchtdiode mit ihrem Vorwiderstand geschaltet; bei mäßiger Umgebungshelligkeit wird die Leuchtdiode gar nicht oder nur äußerst schwach leuchten, erst wenn man das Licht einer Taschen- oder Tischlampe direkt *von oben* auf den Fototransistor richtet, wird der Kollektorstrom so groß, daß die LED angeht. Wir können also festhalten: der Fototransistor reagiert auch auf normales Licht, obwohl er – wie oben gesagt wurde – für Infrarotlicht besonders empfindlich ist.

14.6 Unsichtbare Strahlen

Um das Zusammenwirken von Infrarotdiode und Fototransistor zu erproben, werden zunächst beide Bauelemente rechtwinklig abgebogen, wie es in Bild 185 dargestellt ist, und sodann die Schaltung 187 aufgebaut (Aufbaubild 186).

Wir drücken die Taste (bitte nur kurz drücken, um die Batterie zu schonen!), und wie erwartet, leuchtet die LED auf: Die IR-Diode erzeugt

Bild 183. Aufbau zu Schaltung 184

Bild 184.
Licht steuert Strom

Bild 185. Die Anschlüsse von Fototransistor und Infrarot-Diode werden senkrecht abgebogen.

(unsichtbares) Licht, die Basis des Fototransistors wird aktiviert, es fließt ein Kollektorstrom. Wir machen sozusagen die Gegenprobe, indem wir zwischen IR-Diode und Fototransistor bei gedrücktem Taster ein Stückchen schwarze Pappe halten: nichts tut sich mehr, da der Infrarotlichtstrahl unterbrochen wird. Aus sechs Bauelementen haben wir bereits eine einfache Infrarot-Lichtschranke gebaut!

Bild 187. Erstes Experiment mit Infrarot-Strahlen

Bild 186.
Aufbau zu Schaltung 187

14.7 Licht wird verstärkt

Hier muß sofort korrigiert werden, denn natürlich kann nicht das Licht, sondern nur seine Auswirkung auf den Fototransistor verstärkt werden. Das besorgt in Bild 188 ein zweiter Transistor in Darlingtonschaltung. Der Lichtempfänger ist nun so empfindlich, daß man im abgedunkelten Raum arbeiten muß, damit die LED nicht schon bei normaler Umgebungshelligkeit angeht. Der Abstand IR-Diode/Fototransistor kann dafür aber gehörig vergrößert werden – welche erstaunlichen Distanzen möglich sind, werden wir bei weiteren Experimenten noch erfahren.

14.8 Elektronik-Zauber

Kann man mit einem Streichholz eine Lampe anzünden?
Das klingt ziemlich verrückt, ist es auch, denn man kann es wirklich. Mit Schaltung 191 (Aufbaubild 190) können wir uns im Freundeskreis als Zauberkünstler einen Namen machen. Das Gerät wird bei abgedunkeltem Raum in Betrieb genommen – nichts wird passieren. Erst wenn wir mit entsprechend geheimnisvollen Sprüchen die Geister der Nacht beschwören, ein Streichholz anzünden und es in die Nähe des Fototransistors bringen, geht die Leuchtdiode an und – das ist nun wirklich der Knüller! – bleibt brennen, auch wenn das Streichholz wieder ausgeht.
Noch effektvoller kann der Trick vorgeführt werden, wenn man statt der LED mit ihrem Vorwiderstand das KOSMOS Netzschaltgerät X (siehe Ende des Buches) einsetzt. Mit einem lumpigen

Bild 188. Aufbau zu Schaltung 189

Bild 190. Aufbau zu Schaltung 191

Bild 189. Ein „Lichtverstärker“

Bild 191. Elektronische Zauberei mit Licht

Streichholz kann nun eine Tisch- bzw. Stehlampe oder sogar der Fernseher eingeschaltet werden!
Können die Geräte auch wieder abgeschaltet werden?
Selbstverständlich, mit etwas schauspielerischer Begabung läßt sich auch daraus eine Show inszenieren: Mit beschwörenden Gesten unterbricht man unauffällig den Infrarotlichtstrahl und – unter der Voraussetzung, daß auf den Fototransistor kein Licht der eingeschalteten Lampe fällt! – geht das Gerät wieder aus.
Schnelldenker haben den „Zaubertrick" längst durchschaut: ohne Licht von außen (also z.B. Licht vom Streichholz) ist der Fototransistor gesperrt, dadurch liegt am Eingang E des Verstärkermoduls nun über R2 positive Spannung. Am Ausgang des Verstärkermoduls A liegt nun ebenfalls positive Spannung so daß die LED1 nicht leuchten kann (siehe Tabelle 5, S. 86).
Auch die IR-LED bleibt noch ohne Strom. Bringen wir nun eine Lichtquelle, z.B. ein Streichholz in die Nähe des Fototransistors (ohne ihn dabei zu verbrennen!) so wird dieser leitend und bringt das Verstärkermodul zum Signalwechsel am Ausgang. Die LED1 und die IR-LED leuchten auf. Die IR-LED beleuchtet (unsichtbar) nun den Fototransistor und hält ihn leitend. Erst bei Unterbrechen des Lichtstrahls geht alles wieder aus.
Mit R2 läßt sich die Empfindlichkeit der Schaltung der Umgebungshelligkeit anpassen: Wählt man R2 größer als angegeben, so nimmt die Empfindlichkeit zu, bei kleineren Werten nimmt sie ab. Bei Betrieb mit dem Kosmos-Netzschaltgerät X sollten neue Batterien oder das Kosmos Netzgerät X verwendet werden.

Bild 192.
Aufbau zu Schaltung 193

14.9 IR-Sender auf getrennter Steckplatte

Für die folgenden Schaltungen und Experimente soll der Sender räumlich vom Empfänger getrennt werden. Dazu werden die zweite Steckplatte und eine zusätzliche Batterie (9V-Energieblock) benötigt. Der Batterieclip wird aufgesteckt, die Batterie findet in der viereckigen Aussparung der zweiten Steckplatte Platz.
Wir bauen nun nach Bild 192 einen einfachen Infrarotsender auf (Schaltbild 193), der sich für eine Reihe von Anwendungen als außerordentlich nützlich erweisen wird.

Bild 193. Infrarot-Sender

14.10 Lichtschranke mit Alarm

Den Empfängerteil zeigt Aufbaubild 194. Die Steckplatte mit dem Sender wird so angeordnet, daß sich IR-Diode und Fototransistor in einer gewissen Entfernung genau gegenüberstehen (die maximal mögliche Entfernung muß durch Probieren ermittelt werden). Sobald der (unsicht-

Bild 194.
Aufbau zu Schaltung 195

Bild 195. Lichtschranke mit Alarm

bare) Lichtstrahl unterbrochen wird, ertönt ein unangenehmer Pfeifton als Alarmsignal. Aber Vorsicht: Der Infrarot-Sender ist ein „Stromfresser"; Dauerbetrieb dieser Alarmanlage empfiehlt sich nur mit dem KOSMOS Netzgerät X!

Experimentieranregung:

Vor die Sendediode wird eine Lupe gehalten, um den Strahl zu bündeln. Die Entfernung, die nun mit dem Infrarotstrahl überbrückt werden kann, wird beträchtlich größer – bei einer geeigneten Lupe unter Umständen mehr als ein Meter!

Dieser Versuch sollte nur in einem abgedunkelten Raum durchgeführt werden.

Über den Empfangstransistor kann ein kleines, schwarzes Pappröllchen geschoben werden, um den Einfluß der Umgebungshelligkeit zu mindern.

14.11 Drahtloser Alarmgeber

Das Prinzip der soeben beschriebenen Alarmanlage soll nun ins Gegenteil verkehrt werden: Ein Ton soll erzeugt werden, wenn der Lichtstrahl **nicht** unterbrochen ist. Ein solches Gerät könnte man als universellen, ferngesteuerten Alarmgeber bezeichnen. Er wird nach Bild 196 aufgebaut, Bild 197 zeigt die entsprechende Schaltung.

14.12 Infrarot-Fernsteuerung

Was kann ferngesteuert werden? Nun, um die Funktion zunächst einmal zu studieren, wollen wir uns auf Leuchtdioden beschränken, die ohne jegliche Drahtverbindung zum Sender ein- und ausgeschaltet werden. Später kann dann das KOSMOS Netzschaltgerät X (s. Ende des Buches) hinzugenommen und unsere Fernbedienung in der Praxis für Tischlampen, Cassettenrecorder, Fernsehgeräte usw. eingesetzt werden.

Als Sender wird wieder der Aufbau nach Bild 192 verwendet. Den Empfänger zeigt Bild 198 (Schaltung 199). Er besteht aus einem Monoflop mit Verstärkermodul, das getriggert (ausgelöst) wird, wenn der Fototransistor leitend wird, und einem Flipflop, das bei jedem negativen Impuls, den der Ausgang des Verstärkermoduls liefert, von einer (stabilen) Lage in die andere umschaltet. Die richtige Lage der Sendediode gegenüber dem Fototransistor muß durch Probieren ermittelt werden.

Die Reihenschaltung aus LED1 und *R*v1 oder LED2 und *R*v2 kann durch das oben erwähnte KOSMOS Netzschaltgerät X ersetzt werden.

Bild 196. Aufbau zu Schaltung 197

Bild 198. Aufbau zu Schaltung 199

Bild 199. Infrarot-Fernsteuerung

Bild 197. Drahtloser Infrarot-Alarmgeber

Bild 200. Aufbau zu Schaltung 201

Bild 201. Infrarot-Sender mit Impulsbetrieb

14.13 Flackerndes Licht

Man kann einem Lichtstrahl (in unserem Fall: einem Infrarotlichtstrahl) auch eine Nachricht mit auf den Weg geben. Die einfachste Methode besteht darin, die Sendediode in sehr rascher Folge periodisch ein- und auszuschalten, sie also z.B. durch einen Tongenerator anzusteuern. Der zerhackte Lichtstrahl wird empfängerseitig wieder in elektrische Signale zurückgewandelt, welche verstärkt und einem Lautsprecher zugeführt werden. Auf diese Weise kann also ein Ton fernübertragen werden.
Die erforderliche Sendeschaltung zeigt Bild 201. Der Sender wird wieder auf einer getrennten Steckplatte aufgebaut (Bild 200). Das Verstärkermodul ist als Tongenerator geschaltet, die IR-Diode bezieht ihren Strom aus dem Verstärkerausgang. Um zunächst zu prüfen, ob die Sendeschaltung arbeitet, wird über einen 100-µF-Kondensator und zwei lange Drähte der Lautsprecher an den Verstärkerausgang angeschlossen (im Schaltbild gestrichelt eingezeichnet); drückt man die Taste, so muß ein lauter Ton hörbar sein. Der Lautsprecher kann nun (durch Herausziehen der langen Drähte) wieder abgeschaltet werden.

14.14 Drahtlose Übertragung von Morsesignalen

Die Schaltung eines Empfängers für drahtlos übertragene Töne ist in Bild 203 dargestellt (Kondensator C_2 und LED_1 werden erst später einge-

Bild 202.
Aufbau zu Schaltung 203

Bild 203.
Empfänger für Infrarot-Morsesignale

steckt!). Die durch das „flackernde Licht" am Kollektor des Fototransistors hervorgerufenen Spannungsänderungen werden über den Kondensator *C*1 impulsweise auf die Basis von T1 übertragen. Die Diode wird für die Impulslichtschranke im nächsten Kapitel wichtig sein, wir wollen sie hier nicht weiter beachten. Der Lautsprecher ist über einen Kondensator am Kollektor des letzten Transistors angeschlossen; große Lautstärken sind bei dieser Art von „Endstufe" natürlich nicht zu erwarten. Die Anlage wird in Betrieb genommen, indem die Sendediode zunächst in unmittelbarer Nähe direkt auf den Fototransistor gerichtet und die Taste gedrückt wird. Mit Sicherheit wird nun deutlich ein Ton vernehmbar sein. Jetzt kann der Sender Stück für Stück vom Empfänger entfernt und die maximal mögliche Entfernung herausgefunden werden (nicht vergessen, die Taste zu drücken!).

Experimentieranregung:
Um den Einfluß der Umgebungshelligkeit zu mindern, kann über den Fototransistor ein kleines schwarzes Papphröhrchen geschoben werden; u.U. verbessert diese Maßnahme den Empfang beträchtlich.

14.15 Energiesparende Impulslichtschranke

Wir wollen uns dem weltweiten Trend zum Energiesparen nicht verschließen und die Erkenntnisse aus dem letzten Kapitel für eine Lichtschranke mit gepulstem Licht verwerten. Es leuchtet ja ohne weiteres ein, daß der senderseitige Stromverbrauch rapide sinkt, wenn man den Lichstrahl ständig ein- und ausschaltet. Darüber-

hinaus ergibt sich noch ein theoretischer Vorteil, den wir allerdings nicht ausnutzen: Die Infrarotdiode verträgt kurzzeitig einen außerordentlich hohen Stromstoß, wenn man ihr anschließend genügend Zeit läßt, sich von diesem Stromstoß zu erholen, d.h. sich abzukühlen, um die Gefahr einer Überhitzung abzuwenden. In der industriellen Praxis werden daher mehrere Ampere hohe Stromspitzen von nur einigen Mikrosekunden Dauer, gefolgt von „Ruhepausen" im Bereich von Millisekunden, erzeugt. Der Vorteil liegt auf der Hand: Für kurze Zeit wird eine hohe Lichtintensität hervorgerufen, die dem Sender eine hohe Reichweite verleiht.

Sende- und Empfangsschaltung aus dem letzten Kapitel werden etwas umgebaut. Der Taster auf der Sende-Steckplatte wird herausgezogen und durch eine Drahtbrücke ersetzt (Dauerton!). Beim Empfänger wird der in Bild 202 gestrichelt eingezeichnete Kondensator *C2* zusätzlich eingesteckt, der Lautsprecher-Kondensator *C3* hingegen herausgezogen und statt der Drahtbrücke x eine LED eingesteckt.

Wird nun der Sender auf den Empfänger gerichtet, so geht die Leuchtdiode an. *C2* verhindert, daß die LED flackert; er wird durch die pulsierende Spannung aufgeladen, die Diode D1 verhindert ein rasches Entladen. Unterbrechung des Lichtstrahls (Lichtschranke!) hat mit einer kleinen Verzögerung ein Verlöschen der LED zur Folge.

Experimentieranregung:

Statt der IR-Diode wird eine normale Leuchtdiode eingesetzt. Natürlich funktioniert die Anlage auch damit; da der Fototransistor jedoch seine größtmögliche Empfindlichkeit bei Infrarotlicht besitzt, wird die Reichweite jetzt sehr begrenzt sein.

14.16 Tele-Spiel besonderer Art: ein drahtloser Dimmer

Wie man Lampen, Geräte und dergleichen ohne jegliche Drahtverbindung ein- und ausschalten kann, ist uns aus Kapitel 14.12 noch geläufig. Wir wollen jetzt einen Schritt weitergehen und versuchen, eine LED ferngesteuert langsam abzudunkeln (Aufbau des Empfängers Bild 206, Schaltung 207).

Bild 205. Sender für drahtlosen Dimmer

Bild 204. Aufbau zu Schaltung 205

Bild 206.
Aufbau zu Schaltung 207

Bild 207. Empfänger für drahtlosen Dimmer

Dabei hilft uns die Überlegung, daß man dem Kondensator *C2* nur ein bißchen Zeit zugestehen muß, sich zwischen zwei Impulsen genügend zu entladen, die „Ein-Impulse" also kurz und die „Aus-Impulse" lang zu machen. Im zeitlichen Mittel sinkt die Ladespannung am Kondensator dadurch, und die Leuchtdiode wird dunkler brennen.

Den Trick, das Verhältnis von Ein- und Auszeiten (man nennt dies das **Tastverhältnis**) zu verändern, bewerkstelligen wir am Sender mit dem Potentiometer P1 (Schaltung 205, Aufbaubild 204). Verdreht man P1 feinfühlig, so kann die Helligkeit der Leuchtdiode exakt eingeregelt werden. Etwas Fingerspitzengefühl ist allerdings erforderlich, da der Einstellbereich am Poti nicht sehr groß ist.
Es ist empfehlenswert, den Fototransistor mit einem schwarzen Pappröhrchen zu versehen um Einflüsse der Umgebungshelligkeit zu vermeiden.

14.17 Licht transportiert Musik

Wenn man Radiowellen modulieren kann, dann sollte es eine Kleinigkeit sein, auch den Lichtwellen eine Information „huckepack" mitzugeben, denn beides sind elektromagnetische Wellen, die sich nur durch ihre Frequenz voneinander unterscheiden. Es funktioniert auch tatsächlich, und der Tag ist nicht fern, da ein „schnurloses Telefon" nach dem Prinzip der modulierten Infrarotstrahlen für jeden von uns eine Selbstverständlichkeit sein wird – vielleicht bereits, während dieses Buch gedruckt wird.

Bild 208. Aufbau zu Schaltung 209

Bild 209. NF-modulierter Infrarot-Sender

Bild 209 zeigt das Schaltbild eines Senders für amplitudenmodulierte Infrarotstrahlen: schließt man an den Eingang A einen Cassettenrecorder, Plattenspieler mit Kristallsystem oder ein im Haushalt vorhandenes Radio oder an B ein dynamisches Mikrofon an, so wird der Sendestrahl im Takte der Sprache oder Musik in seiner Intensität ganz leicht schwanken (Aufbau des Senders nach Bild 208).

Der zugehörige Empfänger nach Bild 211 (Aufbau 210) birgt keine großen Geheimnisse in sich. Er besteht aus dem Empfänger-Transistor Tf und den beiden Verstärkerstufen mit T1 und T2. Auch hier gilt: wegen der sehr einfachen Endstufe sind große Lautstärken nicht zu erwarten.

14.18 Optokoppler – Bauelemente der modernen Elektronik

Ein Gebilde, bei dem ein Lichtsender (Leuchtdiode, IR-Diode) auf einen Lichtempfänger (Fototransistor, Fotodiode) gerichtet ist, nennt man Optokoppler. Wenn gefordert ist, zwei Schaltkreise mit verschiedenen Spannungsversorgungen vollkommen voneinander zu trennen („Potentialtrennung"), werden in der Praxis Optokoppler eingesetzt. Sie werden im Handel als fertige Einheiten angeboten (Sender und Empfänger in einem Gehäuse) und können Schaltungen voneinander trennen, zwischen denen Spannungsunterschiede („Potentialdifferenzen") bis zu 1000 Volt bestehen.

Bild 210.
Aufbau zu Schaltung 211

14.19 Optisch gekoppelt zum Schwingen

1000 Volt sind nicht unsere Sache, auch haben wir nicht das Problem, zwei Schaltungsteile voneinander isolieren zu müssen. Das Prinzip des Optokopplers können wir aber dennoch studieren. Wir wollen dies anhand eines astabilen Multivibrators tun, der – neben den erforderlichen Widerständen und Kondensatoren – aus einem gewöhnlichen Transistor, einem Fototransistor und einer IR-Diode besteht (Schaltung 213). In Aufbaubild 212 ist der „Optokoppler" grau hervorgehoben.

Ein Schaltungsvergleich mit Bild 90 zeigt, daß zum normalen astabilen Multivibrator eigentlich gar keine Unterschiede bestehen; lediglich die Basisverbindung zum linken Transistor erfolgt hier über die Opto-Strecke.

Bild 211. Empfänger für moduliertes Infrarot-Licht

Bild 213. Astabiler Multivibrator mit Optokoppler

Bild 212.
Aufbau zu Schaltung 213

14.20 Aufwachen mit Musik – ein helligkeitsgesteuerter Radiowecker

Bekanntermaßen ist das frühe Aufstehen nicht gerade jedermanns Sache. Aber wenn es denn schon sein muß, so sollte man sich zumindest als Elektroniker nicht durch das primitive Klingeln eines 08/15-Weckers aus Morpheus Armen reißen lassen; wir Elektroniker kennen da feinere Methoden, und eine davon wollen wir gleich erproben.
Wir bauen ein Radiogerät, das sich erst dann automatisch einschaltet, wenn der Morgen graut, wenn also genügend Licht zur Verfügung steht, um einen Fototransistor leitend zu machen. Mit einigen Handgriffen kann dafür das Mittelwellen-Audion nach Aufbaubild 133 umgebaut werden. Die Drahtbrücke x wird herausgezogen und durch den Fototransistor ersetzt (darauf achten, daß kürzeres Bein in Steckfeder 27 eingesteckt wird.)
Die Schaltung wird jetzt über den Fototransistor mit Strom versorgt. Fällt kein Licht auf ihn, so ist er gesperrt, und das Radio bleibt stumm, weil der Fototransistor ihm den Betriebsstrom verweigert. Mit dem ersten Hahnenschrei hingegen wird auch der Fototransistor aktiv, weil Licht auf ihn fällt; das Radio erhält Strom und beginnt zu spielen.

Experimentieranleitung
kosmos®
electronic X 3500/X 4000

kosmos

Franckh'sche Verlagshandlung
Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

Teil II

Die neuen Teile des electronic X 4000

	Aufbaudarstellung / Schaltzeichen pnp-Transistor	Dekorplatte DESK II
	Operationsverstärker	
	Vierfach-NAND-Gatter	
	Schalterstreifen	
	Meßinstrument 100 µA 1200 Ω	

Ersatzteilbeschaffung
Sofern defekte oder verlorengegangene Teile nicht über den örtlichen Fachhandel zu bekommen sind, können sie bei **KOSMOS, Abt. Ersatzteile, Postf. 640, 7000 Stuttgart 1,** nachbezogen werden.
Wichtig! Bestellschein vorher mit Postkarte beim Verlag anfordern. Ersatzteillieferungen ohne Bestellschein können leider nicht ausgeführt werden.

15. Vom „specialist“ zum „professional“

Wer uns bis hierhin durch alle Experimente gefolgt ist, darf sich ohne Übertreibung bereits als Spezialisten bezeichnen.
Wir wollen jetzt die nächste Stufe erklimmen und weitere Gebiete der Elektronik erobern. Operationsverstärker-, Meß- und Digitaltechnik werden die Schwerpunkte sein. Wir werden weiterhin versuchen, den Dingen auf den Grund zu gehen, ohne dabei die Theorie überzustrapazieren; hin und wieder jedoch wird es sich als nützlich erweisen, auch einmal eine Gleichung aufzustellen und ein paar sehr einfache Rechnungen durchzuführen.
Wie auch im ersten Teil dieses Experimentierbuches haben wir zunächst die neuen Bauelemente vorgestellt. Nun erfahren wir, wie mit ein paar Handgriffen das zweite Pultgehäuse (operator desk II) mit Meßinstrument und Umschalter montiert wird.

16. Montage des zweiten Pultgehäuses

Wir benötigen für die Montage folgende Teile:
- das Schaltpult,
- die Dekorplatte, DESK II,
- das Meßinstrument,
- den Schalterstreifen,
- den großen Drehknopf
- und die drei kleinen Schrauben.

Außerdem werden noch ein kleiner Schraubenzieher, ein Küchentuch und etwas Haushaltsspülmittel benötigt. Zuerst waschen wir die Schaltpultoberseite, insbesondere die Vertiefung, in die die Dekorplatte eingelegt wird, sauber ab und reiben sie anschließend gut trocken.

Wir legen dann das Meßinstrument in die vorgesehene Aufnahme, wie es Bild C1 zeigt. Auf diesem Bild sehen wir auch, wie die Dekorplatte eingeklebt wird (vorher das Schutzpapier abziehen).

C1

Wir drücken die Dekorplatte fest an, eventuelle Luftblasen kann man zum Rand wegdrücken. Das Schaltpult wird nun umgedreht, und wir legen von unten den Schalterstreifen ein.

Der Schalterstreifen wird zum Schluß mit der dritten Schraube am Schaltpultrand befestigt. Das Schaltpult können wir jetzt wieder umdrehen. Mit dem kleinen Schraubenzieher drehen wir die Aufnahme für den Drehknopf so, daß sie waagerecht steht. Der große Drehknopf kann nun, wie Bild C4 es zeigt, leicht eingedrückt werden; dabei achten wir darauf, daß der Markierungspunkt zu der Zahl Null (0) auf der Dekorplatte zeigt.

C2

C4

Dieser wird so montiert, daß auf dem Steg rechts 3 Bohrungen und links 4 Bohrungen frei bleiben (siehe Bild C2).
Den roten Draht des Meßinstrumentes schließen wir auf dem Schalterstreifen bei Plus (+) und den schwarzen Draht bei Minus (—) an. Die Kabelösen müssen dazu auf den Leiterbahnen festgeschraubt werden (siehe Bild C3).

C3

Damit ist das zweite Schaltpult fertig vorbereitet. Die Bilder C5 und C6 zeigen, wie es an die Steckplatte montiert wird. Wir achten darauf, daß die Kontaktstifte in die entsprechenden Steckfedernlöcher eintauchen und stecken dann **von unten** die beiden Verbindungsstifte ein.

C5

C6

Wenn wir es bislang noch nicht getan haben, sollten wir nun die Steckplatte mit den restlichen Steckfedern bestücken.
Die beiden Schaltpulte und die Steckplatten können auf verschiedene Weise zusammengesteckt werden. Auf den Verpackungen der Kästen electronic X 3000 und X 4000 sind zwei der Möglichkeiten gezeigt. Der Zusammenhalt der Steckplatten wird jeweils durch das Einstecken der Verbindungsstifte erreicht. Die Verbindungsstifte werden, wie auf Bild C8 zu

sehen, immer **von unten** eingesteckt. Im Kapitel 21 werden die Steckplatten nach Bild C7 aneinandergesteckt. Das Digital-Modul wird dabei „über beide Steckplatten hinweg" eingesteckt; die genaue Lage ist den entsprechenden Aufbaubildern ab Kapitel 21 zu entnehmen.

Im folgenden werden wir bei verschiedenen Schaltungen und Geräten den Schalter, der auf dem „operator-desk II" mit „Control" beschriftet ist, als Umschalter benutzen. Bild 214 zeigt zum Ausprobieren eine einfache Umschaltvorrichtung für zwei Leuchtdioden. Schalter in Position 1(„RANGE 1"): linke Leuchtdiode ist eingeschaltet; Schalter in Position 2(„RANGE 2"): rechte Leuchtdiode ist eingeschaltet. Wenn wir den Umschaltknopf langsam von einem Anschlag zum anderen verdrehen, werden wir feststellen können, daß der Schalter in der Mitte ("0") eine leichte Raststellung hat: In dieser Rastposition hat der mittlere Anschluß des Schalters keinerlei Verbindung zu einem der äußeren Anschlüsse. Der Control-Schalter könnte daher auch problemlos anstelle der Drahtbrücke S als Ein/Aus-Schalter benutzt werden; mit zwei längeren Drähten müßten dazu lediglich die entsprechenden Verbindungen hergestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit haben wir allerdings auf die Darstellung der Ein/Aus-Funktion verzichtet.

Bild 214. Anwendungen des Control-Schalters

17. Operationsverstärker-technik

Zunächst wird man über den seltsamen Namen „Operationsverstärker“ stolpern. Welche Art von Operationen sind hier gemeint?
Bevor die heutigen Digitalrechner, die man gemeinhin als „Computer“ bezeichnet, die Welt eroberten, baute man Rechenmaschinen, die mit Hilfe von hochwertigen Verstärkern mathematische Operationen ausführen konnten; man nennt solche Apparate Analogrechner (auf den Unterschied zwischen den Begriffen „digital“ und „analog“ werden wir in Kapitel 21 noch zurückkommen). Ganz ausgestorben sind Analogrechner nicht, durch die inzwischen extrem schnellen Digitalrechner jedoch weitgehend verdrängt worden. Geblieben sind die Operationsverstärker, die für den Elektroniker ein hochinteressantes Bauelement mit einer Fülle von Anwendungsmöglichkeiten darstellen.
Für eine optimale Funktion benötigen die meisten Operationsverstärker zwei Versorgungsspannungen, und da wir nicht gleich zwei Batterien spendieren wollen, besorgen wir uns mit einer elektronischen List eine Doppel-Spannungsversorgung.

17.1 Alleskönner Verstärkermodul: Teilt Spannungen in zwei Hälften

Werfen wir noch einmal rasch einen Blick auf Tabelle 5 : Verbindet man beim Verstärkermodul Eingang E mit dem negativen Pol der Batterie (und läßt den Eingang V unbeschaltet oder legt zur Unterdrückung von Störspannungen lediglich einen Elko zum Ausgang), so stellt sich erfreulicherweise am Ausgang etwa die halbe Batteriespannung ein. Das kann mit Hilfe des Meßinstrumentes sofort nachgeprüft werden: Bild 215 zeigt den Aufbau und Bild 216 das zugehörige Schaltbild. Je nachdem ob der Control-Schalter in der Position 1 oder 2 steht, geht der Zeiger des Meßinstrumentes auf etwa 4,5 oder 9 der Skala.

Bild 216. Das Verstärkermodul erzeugt +4,5V und -4,5V.

Bild 215. Aufbau zu Schaltung 216

17.2 Masse in der Mitte

Es soll für die nachfolgenden Arbeiten mit dem Operationsverstärker gleich eine Vereinbarung getroffen werden, die – wenn man sich die Ausführungen in Kap. 1.3 noch einmal zu Gemüte führt – niemanden überraschen kann: der Anschluß der „halben Spannung" (in Bild 216 mit einem M bezeichnet) soll als Masse definiert werden, so daß mit diesem neuen Bezugspunkt für alle Spannungsbetrachtungen und -messungen eine Spannungsversorgung von etwa +4,5V und -4,5V (bezogen auf die Masse) zur Verfügung steht.
Um die Schaltbilder nicht unnötig kompliziert erscheinen zu lassen, wollen wir weiterhin verabreden, daß alle Schaltungspunkte, die mit der Masse verbunden sind, mit dem Massesymbol gemäß Bild 217 gekennzeichnet werden. Wenn also jemals der Eindruck entstehen sollte, ein Schaltungsteil hinge „in der Luft", so wissen wir (und wir können es anhand des Aufbaus verfolgen), daß alle Punkte mit der Massebezeichnung in Wirklichkeit miteinander Verbindung haben.

Bild 217. Schaltsymbol für die Masse

17.3 Messen heißt vergleichen

So wird es ja auch in der Schule im Physikunterricht gelehrt; eine auszumessende Strecke von sagen wir mal einem Meter wurde früher mit dem in Sèvres bei Paris gelagerten Urmeter „verglichen", d.h. die Skalen aller Meterstäbe („Zollstöcke") und Bandmaße bezogen sich auf dieses Urmeter. Wenn auch das Urmeter heutzutage bestenfalls historischen Wert hat, weil man durch raffinierte Methoden bestimmte Wellenlängen von Lichtstrahlen als Bezugsgrößen heranzieht, so wird doch in der Praxis weiterhin bei allen Messungen lediglich verglichen.
Weil nun dem Vergleichen offensichtlich eine so bedeutsame Rolle zukommt, wollen wir das Verhalten eines Operationsverstärkers zunächst in einer Vergleicherschaltung studieren.

17.4 Kleine Ursache, große Wirkung: Der Komparator

Was tut ein Operationsverstärker mit zwei Spannungen, die ihm frei Haus an die Beine 2 und 3 geliefert werden?
Er betätigt sich als Komparator, als „Vergleicher". Er ist nämlich in der Lage, auf winzige Spannungsunterschiede zwischen seinen Beinen 2 und 3 (wir bezeichnen sie als Eingänge) recht heftig zu reagieren, indem er am Ausgang (Bein 6) eine vergleichsweise hohe negative oder positive Spannung abgibt.

Bild 217 a. Das KOSMOS OP-Modul

Anstelle eines Blicks in das Innenleben des Operationsverstärkers betrachten wir ein Komparator-Modell: Eine Glasplatte steht auf zwei verstellbaren Beinen. Auf der Platte befindet sich eine schwere Stahlkugel. Links und rechts sind bewegliche Metallplatten angebracht, die sich immer gleichzeitig bewegen, da sie mit einem Bügel verbunden sind (Bild 218).

Bild 218. Komparator-Modell: Welches Bein ist niedriger? Die Kugel kann keine Zwischenstellungen einnehmen.

Es wird trotz größter Anstrengungen nicht gelingen, die beiden Beine wirklich absolut gleich einzustellen. Die Glasplatte hat immer eine geringfügige Neigung. Da zwischen Kugel und Glasplatte praktisch keine Reibung besteht, rollt die Kugel nach der einen oder anderen Seite.

Die Kugel ist also in der Lage, die Beinhöhen miteinander zu vergleichen. Ihre Reaktion auf einen Höhenunterschied erfolgt nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip: Auch der kleinste Unterschied zwischen der Höhe der Beine hat zur Folge, daß die Kugel auf die eine oder andere Seite rollt, sie bleibt nie in einer Zwischenstellung liegen. Dabei zeigt sie durch Drücken gegen den linken oder rechten Kontakt an, welches Bein niedriger ist.
Wir besitzen nun ein Anschauungsmodell für den Operationsverstärker als Komparator. Wenden wir uns dem Operationsverstärker selbst zu.

Bild 219. Aufbau zu Schaltung 220

17.5 Alles oder Nichts – das ist hier die Frage

Der Komparator wird nach Bild 219 aufgebaut. In Schaltbild 220 erkennen wir, daß der Eingang, der mit einem Pluszeichen versehen ist (Bein 3), mit einer unveränderlichen Spannung von etwa -1,6V (bezogen auf Masse) verbunden ist (die unveränderliche Spannung wird durch die stabile Durchlaßspannung der Leuchtdiode erzeugt). Der mit einem Minuszeichen versehene Eingang hingegen (Bein 2) ist mit dem Schleifer des Potis verbunden.
Der Potiknopf wird ganz nach links gedreht; beide Leuchtdioden brennen (LED1 wird auch weiterhin brennenbleiben, da sie ja nur die Aufgabe hat, eine stabile Spannung von -1,6V zu erzeugen). Das Poti wird jetzt nach rechts gedreht, dadurch steigt die Spannung am Schleifer an. Wird nun die Schleiferspannung gleich bzw. geringfügig größer als -1,6V, so geht LED2

Bild 220. Einfacher Komparator

aus: Der Komparator „kippt“,d.h. sein Ausgang wechselt von positiver auf negative Spannung (bezogen auf Masse). Die Leuchtdiode ist nun in Sperrichtung geschaltet und kann nicht brennen.

Zurückdrehen des Potis läßt den Komparator wieder umkippen und LED2 angehen. Zwischenwerte gibt es nicht. An oder aus. Ja oder nein. Gekippt oder nicht gekippt. Kleiner als -1,6V oder größer als -1,6V. Eine eindeutige Aussage also unseres Vergleichers. (Mit sehr viel Fingerspitzengefühl wird man es u.U. doch erreichen können, daß die Leuchtdiode zu flackern beginnt bzw. allmählich dunkler wird. Das liegt daran, daß der Operationsverstärker im Umschaltpunkt eine gewisse Schwingneigung hat).

Wir fassen die Ergebnisse des Experimentes zusammen und geben gleich noch ein paar wichtige Erklärungen zu den Eigenschaften des Operationsverstärkers ab:

1. Der Operationsverstärker kann am Ausgang positive oder negative Spannungen erzeugen. Von positiver und negativer Spannung zu sprechen, ist zulässig, weil wir den Bezugspunkt Masse = 0V haben. Wir können z.B. eine positive Spannung mit einer Höhe über dem Meeresspiegel (Höhe des Meeresspiegels = Normalnull), eine negative Spannung mit einer Meerestiefe vergleichen. Beide können zahlenmäßig gleich groß sein, bezogen auf die Meeresoberfläche jedoch unterschiedliche Vorzeichen haben. Der Operationsverstärker-Ausgang hat also nicht einen, sondern zwei **Sättigungspunkte-** einen positiven bei ca. +3V und einen negativen bei ca. -3V.

2. Der Operationsverstärker hat einen Eingangsdifferenzverstärker (siehe Kapitel 13.4) und daher zwei Eingänge.
Er verstärkt den Spannungsunterschied (Differenz) an seinen Eingängen um den Faktor 100.000 bis 200.000. Winzigste Spannungsunterschiede bewirken wegen des hohen Verstärkungsfaktors, daß der Ausgang ohne Zwischenwerte (theoretisch) entweder in die positive oder negative Sättigung geht.

3. Der Operationsverstärker kann invertieren. Invertieren heißt ganz einfach umdrehen, gemeint ist das Ändern des Vorzeichens der Spannung (Bild 221).

Bild 221. Der invertierende Operationsverstärker: Wenn das Männchen am invertierenden Eingang 2 stärker drückt (höhere positive Spannung), geht der Ausgang in die negative Sättigung. Das Anschauungsmodell funktioniert auch, wenn die Männchen ziehen (negative Spannungen).

Welche der Eingangsspannungen wird nun umgedreht, also invertiert, die an Bein 2 oder die an Bein 3?

Da der Operationsverstärker ja nur auf Spannungsdifferenzen reagiert, müssen wir also beide Spannungen betrachten, um diese Frage zu beantworten. Dabei darf nicht vergessen werden, daß diese ebenso wie die Ausgangsspannung immer auf Masse (0 Volt) bezogen werden.

Wir schauen uns zunächst Bein 2 an, das man den invertierenden Eingang nennt (und infolgedessen mit einem Minuszeichen versieht), und bilden die Differenz der Eingangsspannungen. Und zwar in folgender Reihenfolge:
Spannung an Bein 2 minus Spannung an Bein 3.

Hat nun diese Differenz ein **positives** Vorzeichen, so geht Ausgang in die **negative** Sättigung. Ist die Differenz **negativ**, so geht der Ausgang in die **positive** Sättigung. Der Operationsvestärker invertiert also das Vorzeichen der Differenz seiner Eingangsspannungen!

Bein 3 wird nichtinvertierender Eingang genannt und erhält folgerichtig ein Pluszeichen.

Beispiel aus unserem Komparator-Experiment: Schleiferspannung, und damit die Spannung am invertierenden Eingang 2, sei -1,7V, die Spannung an Bein 3 liegt fest auf -1,6V.
Spannung an Bein 2 (-1,7V) minus Spannung an Bein 3 (-1,6V)= -0,1V.
Das Vorzeichen ist negativ, der Ausgang geht in positive Sättigung (LED leuchtet)!

Die wichtigsten Eigenschaften eines Operationsverstärkers haben wir jetzt kennengelernt, und manch einer mag sich gefragt haben, was man mit einer Verstärkung von bis zu 200.000 eigentlich anfangen kann.

Die Antwort ist einfach: Der Komparator ist nur einer von vielen OP-Anwendungen, bei dem die extrem hohe Verstärkung nützlich ist. Wir werden später sehen, daß jede beliebige Verstärkung durch einen einfachen Kunstgriff „einstellbar“ ist, ja daß ein Operationsverstärker selbst mit einem Verstärkungsfaktor von eins hochinteressant sein kann.
Im nächsten Kapitel wollen wir jedoch zunächst einige wichtige Komparator-Anwendungen kennenlernen. Wir werden sehen, wie man mit einem Komparator Kontrollschaltungen, Flipflops, Tongeneratoren und Monoflops bauen kann.

17.6 Komparator-Anwendungen – Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser

Wer hat als Autofahrer nicht schon einmal einen Vordermann gehabt, bei dem nur ein Rücklicht brannte oder nur ein Bremslicht aufleuchtete? Unwillkürlich fragt man sich, ob die Lichter des eigenen Wagens funktionieren und wünscht sich ein Kontrollgerät, das auch während der Fahrt zuverlässig anzeigt, ob Brems- und Rücklicht in Ordnung sind. Solche Kontrollgeräte sollen nun aufgebaut werden.

17.7 Rücklichtkontrolle

Der Aufbau der Schaltung erfolgt nach Bild 222. Auf dem zugehörigen Schaltbild 223 erkennen wir den Operationsverstärker wieder, dessen Ausgang über einen Widerstand LED2 ansteuert (die gestrichelt eingezeichnete LED beachten wir zunächst nicht). Die Kombination aus LED1 und ihrem Vorwiderstand soll das Rücklicht eines Autos darstellen.

Bild 222. Aufbau zu Schaltung 223

Bild 223. Rücklichtkontrolle

Wird die Versorgungsspannung angelegt, so leuchtet das „Rücklicht“ und bleibt brennen. Durch Drehen am Poti können wir LED2 zusätzlich ein- oder ausschalten.
Wir stellen das Potentiometer so ein, daß auch LED2 – unser Warnlicht – leuchtet. Dann drehen wir den Knopf von P1 ganz langsam, bis das Warnlicht gerade erloschen ist. Wir simulieren das Durchbrennen des Rücklichtes durch Herausziehen der Brücke x-y. Das Warnlicht leuchtet sofort auf.

17.8 Bremslichtkontrolle

Eine Bremslichtkontrolle kann die Schaltung nach Bild 223 simulieren, wenn wir sie geringfügig ändern: wir ziehen LED2 heraus, stecken sie an dem Platz links oberhalb der in Aufbau 222 gestrichelt eingezeichneten Drahtbrücke ein und ersetzen außerdem die Brücke u-v durch den Taster. Dann vergewissern wir uns, daß die Brücke x-y eingesteckt ist.
LED1 leuchtet jetzt nur noch auf, wenn der Taster gedrückt ist. Er stellt das Bremspedal dar und die Kombination aus Leuchtdiode mit Vorwiderstand ein Bremslicht.
Die Einstellung des Kontroll-Lichts erfolgt durch Verstellen von P1 bei gedrücktem Taster. Poti zunächst so verdrehen, daß LED2 erlischt, und dann ganz langsam etwas zurückdrehen (immer noch bei gedrücktem Taster), bis sie gerade angeht. Läßt man den Taster los, gehen LED1 und LED2 gleichzeitig aus. Wir simulieren das Durchbrennen des Bremslichtes durch Herausziehen der Brücke x-y. Dann bleibt beim Betätigen der Bremse (Taster) das Kontroll-Licht dunkel.

17.9 Komparator im Kontroll-Einsatz

In beiden Kontroll-Schaltungen ist der Operationsverstärker als Komparator geschaltet. Allerdings liegt Eingang 3 jetzt auf Masse. Damit wird die Spannung am invertierenden Eingang mit 0V verglichen. Der 150-Ω-Widerstand spielt in dieser Schaltung eine Hauptrolle: Fließt durch ihn kein Strom (LED1 dunkel), so liegt Punkt D in Schaltung 223 (wenn man den winzigen Strom durch das Poti vernachlässigt) auf negativer Versorgungsspannung. Leuchtet LED 1 hingegen, so muß ihr Strom den 150-Ω-Widerstand passieren, was nach dem Ohmschen Gesetz einen Spannungsabfall am Widerstand zur Folge hat. Durch diesen Spannungsabfall ändert sich auch die Schleiferspannung und damit die Vergleichsspannung am invertierenden Eingang und bewirkt – wenn das Poti zuvor richtig eingestellt war – ein Kippen des Komparators.

17.10 Für Modellbahner: Automatiksignal an unbeschrankten Bahnübergängen

Aus einem als Komparator betriebenen Operationsverstärker wird im Nu ein waschechtes Flipflop, wenn man nur drei Widerstände, wie im linken Teil von Bild 225 ersichtlich, hinzufügt. Damit das Flipflop auch gleich etwas Interessantes ein- und ausschalten kann, verwenden wir einen astabilen Multivibrator aus Transistoren und benutzen das Ganze als automatischen Warnblinker für einen unbeschrankten Bahnübergang einer Modellbahnanlage: sobald ein Zug sich nähert, wird sie eingeschaltet, und wenn er den Bahnübergang passiert hat, sorgt die Elektronik auch wieder fürs Ausschalten.

Bild 224. Aufbau zu Schaltung 225

Bild 225. Modellbahn-Blinklicht

In Aufbau 224 simulieren wir das Nahen eines Zuges durch Betätigen der Taste Ta1. Sofort setzt das Blinken ein. Drücken der Taste Ta2 stoppt es wieder.

Bild 226. Beispiel für die Anwendung des Modellbahn-Blinklichts in der Praxis

17.11 Komparator als Flipflop

Beim Anlegen der Versorgungsspannung befindet sich der Ausgang des Operationsverstärkers in Bild 225 entweder in der positiven oder in der negativen Sättigung; in welcher, läßt sich nicht vorhersagen. Wir können also für die Schaltungserklärung irgendeinen der beiden Zustände zugrunde legen, z.B. +3V. Die Widerstände 150Ω und 470Ω verbinden den Ausgang mit Masse. Zwischen den Widerständen herrscht ein Spannungswert von etwa +2,5V. Diese Spannung liegt auch am nichtinvertierenden Eingang (Bein 3). Bein 2 ist über einen 1-kΩ-Widerstand mit Masse verbunden und liegt somit auf 0V. Nun sind 0V erheblich weniger als +2,5V (0 Volt minus 2,5 Volt = -2,5 Volt). Damit liegt am invertierenden Eingang die kleinere Spannung: Der Ausgang bleibt in der positiven Sättigung.

Was geschieht nun, wenn Taster Ta1 gedrückt wird?

Bein 2 wird kurzzeitig mit der Versorgungsspannung von +4,5V verbunden. Das ändert die Verhältnisse grundlegend. Am invertierenden Bein 2 liegt jetzt eine größere Spannung als an Bein 3 (+4,5 Volt minus +2,5 Volt = +2,0 Volt): Der Komparator kippt, der Ausgang geht in die negative Sättigung. Läßt man den Taster los, liegt Bein 2 wieder auf Masse. Da aber am Ausgang inzwischen die Polarität umgedreht wurde, liegt Bein 3 jetzt auf –2,5V. Damit bleibt die Spannung am invertierenden Eingang größer, und auch der Ausgang bleibt in der negativen Sättigung. Wird der Taster Ta2 gedrückt, so läuft der Vorgang in umgekehrter Richtung ab. Der pnp-Transistor T1 zwischen Operationsverstärker-Flipflop und Transistor-Blinker dient lediglich dazu, eine zum Blockieren des Blinkers erforderliche Spannung zu erzeugen; die negative Sättigungsspannung des Operationsverstärkers würde dazu nicht ausreichen.

17.12 FVF – Flimmer-Verschmelzungs-Frequenz

Das menschliche Auge ist träge. Zum Glück, denn sonst wäre ein Kinofilm ein entnervendes Zucken schnell sich ändernder Bilder. Die Frequenz, ab der wir ein kontinuierlich ein- und ausgeschaltetes Licht als gleichbleibend hell empfinden, heißt „Flimmerverschmelzungsfrequenz".

Ein einfaches Versuchsgerät zur Erzeugung variabler Frequenzen zeigt Bild 228. Der Operationsverstärker-Komparator im linken Teil ist als astabiler Multivibrator geschaltet, das Flipflop aus den beiden Transistoren halbiert die erzeugte Frequenz und sorgt gleichzeitig dafür, daß stets gleichlange Hell- und Dunkelzeiten entstehen („Tastverhältnis" 1:1). Am Potentiometer P2 können Frequenzen zwischen etwa 50 und 500 Hz eingestellt werden – jeweils den halben Wert davon erhalten wir an der Leuchtdiode.

Bevor wir unser Auge auf die Flimmer-Probe stellen, wollen wir noch rasch ungetrübten Blikkes den Geheimnissen des Frequenzgenerators auf die Spur kommen. Betrachten wir den Moment des Anlegens der Versorgungsspannung: Nach bewährter Methode nehmen wir an, der Ausgang des Operationsverstärkers liege zufällig auf positiver Sättigungsspannung; dann stellt sich an Bein 3 eine positive Spannung ein, die durch das Verhältnis der beiden Widerstände $R1$ und $R2$ gegeben ist (in unserem Falle etwa +2V). Da die beiden 0,1-μF-Kondensatoren im Einschaltmoment ungeladen sind, liegt an Bein 2 für einen winzigen Augenblick eine Spannung von 0V. Die Verhältnisse sind zunächst also klar: Eine kleinere Spannung am invertierenden Eingang hält den Ausgang in der positiven Sättigung. Die Kondensatoren beginnen nun aber, sich über $R3$ und das Potentiometer P2 aufzuladen. Das geht solange gut, wie die Ladespannung (also Spannung an Bein 2) unterhalb von etwa +2V ist. Wird diese Spannung auch nur geringfügig überschritten, setzt der Komparator-

Bild 227. Aufbau zu Schaltung 228

Mechanismus ein. Der Ausgang wechselt von positiver auf negative Sättigung, und nun drehen sich die Verhältnisse um: An Bein 3 liegt eine Spannung von etwa -2V, und damit ist die Spannung am invertierenden Eingang größer als die am nichtinvertierenden Bein 3, der Ausgang bleibt in negativer Sättigung, und die Kondensatoren werden in umgekehrter Richtung aufgeladen, bis die Ladespannung einen Wert erreicht hat, der kleiner als -2V ist. Man sieht, daß dieses Schaltungsgebilde niemals zur Ruhe kommen kann...

Experimentieranregungen:
Der Flimmerverschmelzungspunkt wird ermittelt, indem P2 sehr langsam vom linken Anschlag nach rechts verdreht wird, bis ein gleichmäßiger Leuchteindruck entsteht (von oben auf die LED blicken!). Diese Einstellung wird notiert, sodann P2 an den rechten Anschlag gestellt und nach links verdreht, bis die Diode wieder zu flackern beginnt. Beide Messungen sollen mehrfach wiederholt werden. Die Versuche werden nun zu verschiedenen Tageszeiten ausgeführt. Man wird feststellen können, daß die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei Müdigkeit niedriger liegt als im Wachzustand.
Mit verschiedenen Versuchspersonen kann ermittelt werden, welchen Einfluß das Lebensalter hat. Wie wirken sich Tee, Kaffee und (bei Erwachsenen) der Genuß von Alkohol oder einer Zigarette auf die FVF aus?

Bild 228. Flimmer-Verschmelzungs-Frequenz

17.13 Komparator mit „langer Leitung" – Monoflop

Nur ein Bauteil muß zum astabilen Multivibrator hinzugefügt werden, damit er sich monostabil verhält: Die Diode in Bild 230 verhindert, daß Bein 2 negativ wird, so daß der Ausgang beim Drücken der Taste zwar in die positive Sättigung geht (die Diode wirkt dann in Sperrichtung), nach Ablauf der Kondensator-Ladezeit jedoch wieder in die Ruhestellung zurückkehrt und dort bis zu einem erneuten Tastendruck verharrt (Aufbaubild 229). Die Verzögerungszeiten, die man mit einem Operationsverstärker-Monoflop erreichen kann, sind wesentlich höher als bei einer Transistorschaltung.

Bild 230. Monoflop mit OP

Bild 229. Aufbau zu Schaltung 230

Experimentieranregung:
Verschiedene Widerstandswerte für *R*3 können im Verein mit 10-µF- und 100-µF-Kondensatoren probiert werden. Bei 220kΩ und 100µF haben wir eine Monozeit von etwa 17 Sekunden ermittelt.
Die Leuchtdiode kann herumgedreht werden; dann funktioniert das Ganze als Einschaltverzögerung (beim Drücken der Taste geht die LED aus und erst nach Ablauf der Verzögerungszeit wieder an). Diese Betriebsart eines Monoflops findet häufig bei elektronischen Weckern Anwendung: Für absolute Morgenmuffel haben solche Wecker einen „Snooze"-Knopf, den man bei Ertönen des Wecksignals drücken muß, wenn man noch ein paar Minuten weiterschlummern möchte. Nach Ablauf der Monozeit wird das Wecksignal erneut eingeschaltet usw.

18. Meßtechnik – 1. Teil

18.1 Die Kraft, die Löffel verbiegt

Natürlich haben wir es in der Elektronik nicht mit Telekinese oder spiritistischen Séancen zu tun, und daher müßte ein Löffel schon von einem sehr starken Strom durchflossen werden, wenn er sich verbiegen sollte. Gehen tut's aber auf jeden Fall, denn jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben, und wo ein Magnetfeld ist, da ist auch eine Kraft.
Die magnetische Kraftwirkung des elektrischen Stromes macht man sich z.B. bei einem Drehspul-Meßinstrument zunutze, das Bild 231 schematisch zeigt.

Bild 231. Schema eines Drehspul-Meßinstrumentes

Eine Spule aus haarfeinem Draht ist drehbar zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten aufgehängt. Fließt nun durch diese Spule ein Strom, so ruft er ein zusätzliches Magnetfeld hervor, wobei Nord- und Südpol sich anziehen und Nord- und Nord- bzw. Süd- und Südpol sich abstoßen: Die Spule dreht sich und mit ihr der Zeiger.

Gleichzeitig wird eine kleine Spiralfeder gespannt, so daß der Zeiger zum Stillstand kommt, wenn Federkraft und magnetische Kraft gleichgroß sind. Der Ausschlag des Zeigers entspricht der Stromstärke durch die Spule.
Die Bilder 232 und 233 zeigen, wie ein Meßwerk in der Praxis aufgebaut ist.

Bild 232. Der Dauermagnet liegt innen, die Spule dreht sich um ihn herum.

Wir erkennen die drehbar gelagerte Spule wieder, die hier auf einen dünnen Rahmen gewickelt ist. An diesem Rahmen ist der Zeiger befestigt und ihm gegenüber ein Gegengewicht als Ausgleich für das Gewicht des Zeigers, so daß der Zeigerausschlag möglichst unabhängig von der Gebrauchslage des Instrumentes wird.
Der Dauermagnet (in unserem Schema: der Hufeisenmagnet) befindet sich erstaunlicherweise nicht außerhalb, sondern innerhalb der Spule als Magnetkern, Die Spule kann sich um ihn herumdrehen.

Bild 233. Ein Meßinstrument aus der Praxis

Damit den magnetischen Kraftlinien der günstigste Weg gewiesen wird, ist außerhalb der Spule eine Wanne aus magnetisch leitendem Werkstoff befestigt, die dafür sorgt, daß die Magnetkraft vorwiegend in dem engen Luftspalt wirkt, in dem sich die Spule drehen kann.
Die magnetischen Kraftlinien sind als (gedachte) Pfeile dargestellt. Wegen der verschiedenen Form von Magnetkern und Wanne sind die Kraftlinien dort, wo der Luftspalt auf halber Höhe etwas enger wird, dichter gezeichnet als daneben. Der unterschiedliche Luftspalt hat eine Spreizung der Anzeige in der Skalenmitte zur Folge. Bei unserem Meßinstrument ist diese Spreizung gewissen Toleranzen unterworfen.

18.2 Widerstand im Innern

Die Spule aus haarfeinem Draht in unserem Meßinstrument hat einen Widerstand von 1200 Ohm (1,2kΩ). Diesen nennt man **Innenwiderstand** des Instrumentes. Sein Magnetsystem ist so ausgelegt, daß der Zeiger um 10 Skalenteile ausgelenkt wird ("Vollausschlag"), wenn durch die Spule ein Strom von 100µA fließt. Nach dem Ohmschen Gesetz fällt also am Meßinstrument bei Vollausschlag eine Spannung ab, entsprechend:

$$U = I \cdot R = 0{,}0001\ \text{A} \cdot 1200\ \Omega = 0{,}12\ \text{V}$$

Diese Erkenntnis hilft uns weiter, wenn wir überlegen, wie man das kleine Instrument auch zu Spannungsmessungen heranziehen kann. Wenn wir uns z.B. vornehmen, daß wir Spannungen bis zu 10V ausmessen wollen (also 1 Skalenteil = 1V), so muß lediglich ermittelt werden, welchen Vorwiderstand man in Reihe mit dem Meßinstrument schalten muß, damit bei 10V durch die Summe aus Vorwiderstand und Meßgerät-Innenwiderstand ein Strom von 100µA fließt. Auch hier hilft Herr Ohm weiter. Aus

folgt: $U = 10\ \text{V} = I \cdot R = 100\ \mu\text{A} \cdot (R_v + R_i)\ \text{k}\Omega$
$R_v = 100\ \text{k}\Omega - R_i = 98{,}8\ \text{k}\Omega$

Wir wollen bei der Auswahl des Vorwiderstandes einen Fehler um die 1% in Kauf nehmen und R_v zu 100kΩ festlegen. Bild 234 zeigt das Schaltbild unseres Meßgerätes für Spannungsmessungen bis 10V.

18.3 Stromverzweigung und Kirchhoffsche Regeln

Elektronik-Anfängern bereitet es oft Schwierigkeiten, in einem Stromlaufplan „zu lesen", d. h. dieFunktion der Schaltung zu erkennen. In den folgenden Kapiteln bringen wir daher einige aufschlußreiche Überlegungen und Rezepte, die sich bei der Beurteilung von unbekannten Schaltungen sicherlich als sehr hilfreich erweisen werden.

Bild 235. Stromverzweigung: Der Gesamtstrom besteht aus der Summe der Teilströme.

Bild 237. Messungen an einer Stromverzweigung

18.4 Getrennt marschieren, vereint schlagen

Was als Kriegsstrategie gilt, kann man auch auf Elektronen anwenden, wenn mehr Strom fließen soll, als ein einzelner Widerstand durchlassen kann. Die taktische Maßnahme heißt in diesem Falle: Dem Strom einen zweiten Weg anbieten. Dies ist durch Parallelschalten von Widerständen möglich (Bild 235).

Im folgenden Experiment werden drei Messungen durchgeführt, indem nacheinander die jeweiligen Brücken herausgezogen und an ihre Stelle das Instrument eingesteckt wird (Schaltbild 236, Aufbau 237).

Bild 236. Aufbau zu Schaltung 237

Durch den 220-kΩ-Widerstand fließen rund 41μA (= 4,1 Skalenteile auf dem Instrument), durch den 1-MΩ-Widerstand zusätzliche 9μA; dies bestätigt uns die Messung an Punkt 3, an dem wir die Summe beider Ströme, nämlich etwa 50μA messen.
Folgende Formel für den Gesamtstrom kann man aus den Messungen direkt ablesen:

(F18) $I_{ges} = I_1 + I_2$ (Summe der Einzelströme)

Setzen wir nach Ohmschem Gesetz

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ und } I_2 = \frac{U}{R_2}$$

in Formel 18 ein, so erhalten wir

$$I_{ges} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

$R1 = 1\,\text{M}\Omega$, $R2 = 220\,\text{k}\Omega$

$$R_{ges} = \frac{1\,\text{M}\Omega \cdot 0{,}22\,\text{M}\Omega}{1{,}22\,\text{M}\Omega} = 0{,}18\,\text{M}\Omega = 180\,\text{k}\Omega$$

(F19)

Der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung ist

$$R_{ges} = \frac{U}{I_{ges}} = \frac{U}{U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Durch das Parallelschalten eines 1-MΩ- und eines 330-kΩ-Widerstandes ist also derselbe Effekt erzielt worden, als hätten wir einen einzelnen 180-kΩ-Widerstand. Mit der Strategie „getrennt marschieren, vereint schlagen", läßt sich also mit wenigen Widerständen eine große Anzahl unterschiedlicher Werte herstellen.
Taucht das Problem auf, daß durch Parallelschalten eines Widerstandes Rx zu einem gegebenen Widerstand $R1$ ein gewünschter Gesamtwiderstand hergestellt werden soll, so kann Formel F19 umgestellt und der unbekannte Widerstand direkt bestimmt werden:

(F20) $$R_X = \frac{R_1 \cdot R_{ges}}{R_1 - R_{ges}}$$

18.5 Der Strom geht den Weg des geringsten Widerstandes

Bei den Messungen im vorangegangenen Kapitel fiel auf, daß durch den größeren Widerstand der kleinere Strom, und durch den kleineren Widerstand der größere Strom floß.
Die Ströme verhalten sich also umgekehrt wie die Widerstände:

(F21) $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$

18.6 Die Regeln des Herrn Kirchhoff

Nach den Ergebnissen des vorletzten Kapitels klingt die **erste Kirchhoffsche Regel** schon fast selbstverständlich: „An jedem Verzweigungspunkt (Knotenpunkt) mehrerer Leiter ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme".

Was in unserem Knotenpunkt K nach Bild 237 als $Iges$ (50μA) hineinfließt, das fließt als $I1$ (41μA) und $I2$ (9μA) getrennt wieder heraus. Dies wird als Stromverzweigung bezeichnet.
Gibt man den zufließenden Strömen ein positives und den abfließenden Strömen ein negatives Vorzeichen, so ergibt die Zusammenrechnung in jedem Knotenpunkt Null.
Diese Regel stellte der deutsche Physiker Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887) auf, der sich eingehend mit Stromverzweigungen in Widerstandsnetzwerken befaßt hat.
Herr Kirchhoff hat dann noch eine zweite Regel aufgestellt; sie bezieht sich auf Spannungen und Spannungsabfälle in Stromkreisen. Sie heißt: „In geschlossenen Stromkreisen ist die Summe aller Spannungen gleich Null" oder

(F22) $U_1 + U_2 + U_3 \ldots = 0$

Auch diese Regel läßt sich durch wenige Messungen überprüfen. Den notwendigen Aufbau zeigt Bild 238, das Schaltbild 239. Das Meßinstrument wird als Spannungsmesser für 10V benutzt; an allen Widerständen werden der Reihe nach Spannungsmessungen durchgeführt.

Es werden sich etwa folgende Werte ergeben:

Widerstand	**Spannungsabfall**
$R1$	5,5V
$R2$	6,4V
$R3$	0,9V
$R4$	2,6V

Bild 238. Aufbau zu Schaltung 239

Bild 239. Messungen verschiedenen Maschen

18.7 Kleiner „Maschenknigge“

Um die Meßergebnisse auswerten zu können, brauchen wir zunächst noch den kleinen „Knigge“ für den Umgang mit der zweiten Kirchhoffschen Regel:

1. Ein geschlossener Kreis, unabhängig davon, ob er eine Spannungsquelle enthält oder z.B. nur ein Widerstandsnetzwerk ist, wird als „Masche“ bezeichnet.

2. Spannungen (Spannungsabfälle an Widerständen, Batteriespannungen) werden in einer Masche mit Zählpfeilen gekennzeichnet.

3. Die Zählpfeile werden in Richtung der technischen Stromrichtung gezeichnet.

4. Trifft man beim Durchfahren einer Masche auf die Spitze eines Pfeils, so wird die betreffende Spannung mit einem negativen Vorzeichen gerechnet, trifft man auf das Ende eines Pfeils, so geht die Spannung mit positivem Vorzeichen in die Rechnung ein.

Bild 240. Betrachtung einer einzelnen Masche

Diese Verhaltensmaßregeln auf Masche KLMNP in Bild 240 angewandt, ergibt:

Start bei K in Richtung L.

Zählpfeil zeigt in Marschrichtung, also 6,4V positiv rechnen.
Von L nach M kein Spannungsabfall.
Von M über N nach P zwei Pfeile, der Marschrichtung entgegengesetzt, Spannungsabfälle 0,9V und 5,5V negativ rechnen.
Von P nach K kein Spannungsabfall.

Summe aller Spannungen in der Masche:
6,4V + (-0,9V) + (-5,5V) = 0V
Natürlich funktioniert die Rechnung bei jeder anderen möglichen Masche, z.B.
Pluspol Batterie – K – L – Minuspol Batterie:

Pluspol Batterie nach K:	+2,6V
K nach L:	+6,4V
L nach Minuspol:	0V
Minuspol nach Pluspol	–9,0V
Zusammen:	0V

19. Leicht zu handhaben: Der gezähmte Operationsverstärker

Bestens ausgerüstet mit Kenntnissen über Strom- und Maschenregeln wollen wir nun der unhandlich hohen Verstärkung des Operationsverstärkers zu Leibe rücken, indem wir ihm ein Widerstandskorsett verpassen, das wir nach unseren Wünschen maßschneidern können.

19.1 Der invertierende Verstärker

In den Komparatorschaltungen konnte der Operationsverstärker ungezügelt seine volle Verstärkung entfalten: Bereits bei geringen Spannungsdifferenzen zwischen den Eingängen ging der Ausgang sofort in die Sättigung. Für Komparatorzwecke ist diese Eigenschaft erwünscht, nicht jedoch, wenn man mit dem OP eine Spannung um einen bestimmten Faktor, z.B. 10, verstärken will.

Bild 241. Das Wort Masche ist in der Elektrotechnik sehr gebräuchlich; Elektroniker sprechen auch manchmal von einer „gestrickten Schaltung“ (bei einem sehr „wilden“ Aufbau).

Die Zähmung des Operationsverstärkers erreicht man durch negative Rückkopplung: Das Ausgangssignal wirkt dem Eingangssignal entgegen. Um diesen Vorgang zu veranschaulichen, betrachten wir folgendes System (Bild 242):

Bild 242. Ein Regelkreis mit negativer Rückkopplung. Wird die Kochplatte heißer, so steigt der Widerstand des Metallblocks, und der Strom sinkt ab.

Die Temperatur einer ans Lichtnetz angeschlossenen Kochplatte soll unabhängig von Umgebungseinflüssen konstant gehalten werden. Man bringt deshalb oberhalb der Kochplatte einen

Metallblock an, dessen Widerstand beim Erhitzen steigt. Der Metallwiderstand wird mit der Kochplatte elektrisch in Reihe geschaltet. Ein Regelprozeß kommt in Gang: Steigt die Temperatur der Kochplatte an, so wird der Widerstand des Metallblockes größer. Dadurch wird der Strom kleiner, und die Kochplatte heizt weniger. Kühlt man die Kochplatte ab, so sinkt der Widerstand des Metallblocks, es fließt nun mehr Strom, und die Heizleistung der Kochplatte steigt wieder an.
Bei gegebener Netzspannung stellt sich automatisch ein Gleichgewichtszustand ein, und die Temperatur bleibt konstant. Einen solchen **Regelkreis**, bei dem die Ausgangsgröße (Wärme) eine negative Auswirkung auf ihre eigene Ursache (Strom) hat, stellen wir beim Operationsverstärker dadurch her, daß wir vom Ausgang des OP einen Widerstand zum invertierenden Eingang schalten. Negativ ist diese Rückkopplung deshalb, weil am Ausgang eines OPs das Signal des invertierenden Eingangs mit umgekehrtem Vorzeichen erscheint (wenn der andere Eingang auf Masse gelegt ist).
Die Grundschaltung eines sogenannten invertierenden Verstärkers mit einem fest eingestellten Verstärkungsfaktor zeigt Bild 243. Damit der Ausgang nicht in die Sättigung geht, dürfen an den Eingängen nur minimalste Differenzspannungen auftreten. Durch das Prinzip der negativen Rückkopplung stellt eine bestimmte Ausgangsspannung selbsttätig diejenige winzige Eingangsspannung ein, die für ihre Entstehung erforderlich ist.

Wie hoch ist nun der Verstärkungsfaktor in Bild 243?

Bild 243. Maschenbetrachtung am invertierenden Verstärker

Da wir Spannungen verstärken wollen, gilt:
Verstärkung =
Ausgangsspannung:Eingangsspannung
oder

(F23) $$V = \frac{-U_a}{U_e} = \frac{R1}{R2}$$

Die Beziehungen für Ua und Ue beschaffen wir uns jeweils nach der Kirchhoffschen Maschenregel:

1) $-U_a - I2 \cdot R2 + U_n = 0$
(Masche : Masse – A – K – Masse)
2) $-U_e + I1 \cdot R1 + U_n = 0$
(Masche : Masse – E – K – Masse)

Wenn wir annehmen, daß in den OP am Eingang weder Strom hineingeht noch herauskommt (in der Praxis beträgt der Eingangsstrom auch nur Bruchteile von µA), so muß der Strom $I1$, der in den Knotenpunkt K hineinfließt, genauso groß sein wie der Strom $I2$, der aus ihm herauskommt (1. Kirchhoffsche Regel):

$$I1 = I2 = I$$

Wenn weiter beachtet wird, daß Un (also die Spannungsdifferenz direkt an den OP-Beinen) winzig klein ist, macht man keinen großen Fehler, wenn man sie bei den beiden Maschengleichungen als Un = 0V setzt.
Damit erhalten wir:

$$-U_a - I \cdot R2 = 0$$
$$-U_e + I \cdot R1 = 0$$

Aus diesen beiden Gleichungen erhalten wir:

$$\frac{-U_a}{U_e} = V = \frac{R2}{R1} \text{ oder: } U_a = -U_e \cdot \frac{R2}{R1}$$

Wir können also an einem OP eine beliebige Verstärkung durch zwei ganz gewöhnliche Widerstände einstellen!
Die wichtigsten Eigenschaften des invertierenden Verstärkers sind:
1. Eingangs- und Ausgangsspannung haben verschiedene Polarität, daher das Minuszeichen in Formel F23.
2. Eine angelegte Spannung kann nicht nur verstärkt, sondern auch abgeschwächt werden; dann nämlich, wenn $R2$ kleiner ist als $R1$.
3. Da der nichtinvertierende Eingang auf Masse gelegt ist und zwischen den Eingängen praktisch keine Spannungsdifferenz besteht, liegt auch der invertierende Eingang praktisch auf Masse; man spricht von einem **virtuellen Nullpunkt**.
Dies ist wichtig für die Betrachtung des Eingangswiderstandes: Der an und für sich hohe Eingangswiderstand des OP kommt nicht zum Tragen, und $R1$ wird zum Eingangswiderstand der Gesamtschaltung.
In Schaltung 243 berechnet sich die Verstärkung des OP zu

$$V = \frac{R2}{R1} = \frac{1\,\text{M}\Omega}{100\,\text{k}\Omega} = 10$$

19.2 Signale aus der Kartoffel

Was kann mit dem Verstärker aus Bild 243 um den Faktor 10 verstärkt werden?
Ungewöhnlich, aber hochinteressant: eine normale Kartoffel kann zur Erzeugung einer sehr kleinen, aber mit Hilfe unseres Verstärkers nachweisbaren Spannung aktiviert werden. Was braucht man dazu? Zunächst natürlich eine Kartoffel, dann (mit der freundlichen Erlaubnis der Hausfrau) eine silberne Gabel und ein

Bild 245. Welche Spannung liefert eine Kartoffel?

Bild 244. Aufbau zu Schaltung 245

gewöhnliches Küchenmesser. Messer und Gabel werden in die Kartoffel eingestochen und ihre Metallteile mit dem Eingang unseres Verstärkers verbunden, wie es in Schaltbild 245 und Aufbaubild 244 dargestellt ist.
Anmerkung: Das Potentiometer P2 wirkt in dieser Schaltung wie ein Festwiderstand von 100kΩ (Schleifer ist nicht angeschlossen).
Das Meßinstrument wird einen Ausschlag zwischen ein und zwei Skalenteilen bringen, also 1...2V am Verstärkerausgang signalisieren. Um die Kartoffel-Spannung zu ermitteln, muß dieser Wert durch den Verstärkungsfaktor (also durch 10) dividiert werden: der unscheinbare Erdapfel liefert eine Spannung zwischen 100 und 200mV!
Das Geheimnis der Kartoffel-Batterie liegt übrigens in den unterschiedlich „edlen" Metallen: Silber ist viel edler als das Eisen des Messers, und das Ganze stellt nichts weiter als ein galvanisches Element dar, zu dem die Kartoffel eine äußerst schwache Säure beisteuert.

19.3 Der nichtinvertierende Verstärker

Bild 246 zeigt die Beschaltung des nichtinvertierenden Operationsverstärkers. Auch hier wird das Prinzip der negativen Rückkopplung angewandt, allerdings wird nur ein Teil der Ausgangsspannung zurückgeführt; $R1$ und $R2$ bilden einen Spannungsteiler. Da die Differenzspannung zwischen den Eingängen so gering ist, daß man sie zu Null annehmen kann, liegt am invertierenden Eingang eine Spannung, die praktisch genauso groß ist wie U_e. Die Rechnung wird wiederum sehr einfach (Kirchhoffsche Maschenregel):

1) $-U_a + I(R1 + R2) = 0$
(Masche : Masse – A – K – Masse)
2) $-U_e + I \cdot R2 = 0$
(Masche : Masse – E – K – Masse)

Die Verstärkung folgt zu:

$$V = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R1 + R2}{R2} = 1 + \frac{R1}{R2}$$

Bild 246. Maschenbetrachtung am nichtinvertierenden Verstärker

Worin besteht der Unterschied zum invertierenden Verstärker?
1. Eingangs- und Ausgangsspannung haben dieselbe Polarität.
2. Am nichtinvertierenden Verstärker lassen sich keine Verstärkungsfaktoren kleiner als 1 einstellen, d.h. man kann Spannungen nicht abschwächen.
3. Der Eingangswiderstand ist extrem hoch.
Experimentieranregung:
Was der invertierende Verstärker mit einer Kartoffel zuwege bringt, muß der nichtinvertierende natürlich auch schaffen. Der Verstärkungsfaktor ist in Bild 248 nicht exakt 10, vielmehr ergibt die Rechnung den Wert 10,4: V = 1 + (940 dividiert durch 100), aber das spielt für das Kartoffelexperiment überhaupt keine Rolle. Zwei Dinge sind für uns interessant:
1. Da der Eingangswiderstand der Schaltung sehr hoch ist, sollte man den Eingang nicht „offen" lassen; bei offenem Eingang geht der Ausgang in die Sättigung. Wir haben daher einen Umschalter mit den Funktionen „Messen" und „Nullen" vorgesehen, um diesen unangenehmen Effekt zu beseitigen.
2. Während man beim invertierenden Verstärker am Meßinstrument ein langsames Absinken der Spannung beobachten konnte, steht die gemessene Spannung jetzt eisern: Der Eingangswiderstand des nichtinvertierenden Verstärkers ist so hoch, daß unsere Kartoffel-Batterie praktisch keinen Strom an die Meßschaltung liefern muß.

19.4 Ein Verstärker, der nicht verstärkt

Der Eingangswiderstand kann noch weiter gesteigert werden, wenn man den invertierenden Eingang ohne Widerstandsbeschaltung direkt mit dem Ausgang verbindet (Bild 249). Eine

Bild 247. Aufbau zu Schaltung 248

Bild 248. Nichtinvertierender „Kartoffel-Verstärker“

Bild 249. Nichtinvertierender Verstärker als Impedanzwandler

Überprüfung nach Kirchhoff würde ergeben, daß der Verstärkungsfaktor bei dieser Schaltung eins ist. Sie wird in der Praxis als „Impedanzwandler" eingesetzt (= Widerstandswandler: hoher Eingangswiderstand, niedriger Ausgangswiderstand). Ein hoher Eingangswiderstand bedeutet, daß in den Verstärker nur ein außerordentlich kleiner Strom hineinfließt, niedriger Ausgangswiderstand heißt, daß der Verstärker an seinem Ausgang einen beträchtlichen Strom liefern kann.

19.5 Rechnende Elektronik – addieren und subtrahieren

Von Analogrechnern, die dem Operationsverstärker zu seinem merkwürdigen Namen verholfen haben, war bereits die Rede. Wir wollen der Vollständigkeit halber hier ein paar kleine Kostproben von den Rechenkünsten eines Operationsverstärkers geben.
Beginnen wir mit dem Einfachsten vom Einfachen: Zwei Spannungen sollen addiert werden, z.B. die Durchlaßspannung einer Leuchtdiode, die ja bekanntlich etwa 1,6V beträgt, und die Durchlaßspannung einer Siliziumdiode, die man zu 0,6V annehmen kann. Das Ergebnis der Addition – und deshalb haben wir dieses einfache Beispiel gewählt – kann also bereits in etwa vorausgesagt werden: 1,6V + 0,6V = 2,2V müssen als Resultat am Ausgang des Operationsverstärker-Addierers meßbar zu Verfügung stehen.
In Bild 251 haben wir die „Summanden" jeweils in ein kleines Kästchen gesetzt und gehen also davon aus, daß aus dem linken Kästchen 1,6V und aus dem rechten Kästchen 0,6V herauskommen. Da hier, wie man auf einen Blick sieht, der Operationsverstärker in einer invertierenden

Bild 250. Aufbau zu Schaltung 251

Schaltung betrieben wird, können wir schon ahnen, daß er das Additionsergebnis mit umgekehrtem Vorzeichen anbieten wird. Dies wurde bei der Polung des Meßinstrumentes in Schaltung 251 berücksichtigt (Aufbaubild 250).
Anmerkung: Das Potentiometer P1 wirkt in dieser Schaltung wie ein Festwiderstand mit 10kΩ (Schleifer nicht angeschlossen).

Bild 251. Ein Addierer in der Praxis

19.6 Mit drei Maschen zum Ergebnis

Spätestens jetzt werden wir die Erleuchtung haben, daß die so simple Maschenregel des Herrn Kirchhoff ein ausgesprochen nützliches Werkzeug ist: Wer sie auch nur annähernd beherrscht, wird mit dem Verständnis von OP-Schaltungen kaum Schwierigkeiten haben.
Die Grundschaltung eines Addierers bzw. Summierers zeigt Bild 252. Unter der Berücksichtigung, daß *U*n so klein ist, daß man es zu 0 annehmen kann, folgt mit der Kirchhoffschen Maschenregel:

1) $-U1 + I1 \cdot R = 0$ oder: $U1 = I1 \cdot R$
(Masche : Masse – E1 – K – Masse)
2) $-U2 + I2 \cdot R = 0$ oder: $U2 = I2 \cdot R$
(Masche : Masse – E2 – K – Masse)
3) $-U_a - (I2 + I1) \cdot R = 0$
oder: $-U_a = (I1 + I2) \cdot R$
(Masche : Masse – A – K – Masse)

Addiert man 1) und 2), so folgt:

$$U1 + U2 = R \cdot (I1 + I2)$$

Dies in 3) eingesetzt:

(F24) $U_1 + U_2 = -U_a$

Wie vorausgesagt, erhalten wir die Summe mit negativem Vorzeichen, was jedoch nicht störend ist, da uns nur der Zahlenbetrag interessiert.

Bild 252. Maschenbetrachtung am Addierer

19.7 Mit Kirchhoff subtrahiert

Die Wirkungsweise eines Subtrahierers (Bild 253) ist ebenfalls sehr leicht zu verstehen, wenn man beachtet, daß hier der nichtinvertierende Eingang nicht auf Masse liegt, die Spannnung zwischen den Eingängen des OP jedoch wieder zu 0 angenommen werden kann.

Bild 253. Maschenbetrachtung am Subtrahierer

Wir wenden dreimal die Kirchhoffsche Maschenregel an und erhalten folgende Beziehungen:

1) $-U1 + I1 \cdot R + I2 \cdot R = 0$
   (Masche : Masse – E1 – K – K' – Masse)
2) $-U2 + I2 \cdot R + I2 \cdot R = 0$
   (Masche : Masse – E2 – K' – Masse)
3) $-U_a - I1 \cdot R + I2 \cdot R = 0$
   (Masche : Masse – A – K – K' – Masse)

Wenn man diese drei Gleichungen ein bißchen „mischt", so erhält man:

(F25) $U_1 - U_2 = -U_a$

Die Differenz hat ein negatives Vorzeichen, da der OP invertiert.

19.8 Der Integrierer

Integrieren ist wie Multiplizieren und Addieren eine Rechenoperation. Auf die mathematische Darstellung und auf die Bedeutung dieser Rechenmethode kann im Rahmen dieses Buches nicht eingegangen werden. Wir werden allerdings beschreiben, wie eine Integrierschaltung aussieht, wie sie funktioniert und wozu man sie benutzen kann.

Bild 254 zeigt die Schaltung eines einfachen Integrierers. Der OP ist nicht mit einem Widerstand, sondern mit einem Kondensator gegengekoppelt. Dieser bewirkt, daß die Ausgangsspannung nicht konstant bleibt, sondern sich mit fortschreitender Zeit ändert, selbst wenn die Eingangsspannung *Ue* gleichgroß bleibt. Wenn *Ue* klein ist, so steigt die Spannung *Ua* langsam an, ist *Ue* hingegen groß, so steigt *Ua* schnell. Natürlich kann auch hier *Ua* nie größer werden als die Sättigungsspannung des Operationsverstärkers.

Bild 254. Schema eines Integrierers

Für den betrachteten Fall einer konstanten Eingangsspannung ist folgende bereits fertig ausgerechnete Formel gültig:

(F26) $U_a = \frac{-U_e}{R \cdot C} \cdot t$

Das Minuszeichen deutet an, daß *Ua* „negativ steigt", bei positiver Eingangsspannung also absinkt.
Mathematisch Versierte sehen auf einen Blick, daß die Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung nicht nur von dem vorgewählten Wert für *Ue*, sondern auch von der Kapazität *C* und dem Widerstand *R* abhängt.

19.9 Atemakrobatik mit Elektronik

Wie lange kann jemand die Luft anhalten? Mit einem Integrator kann man's ausmessen, denn wenn in Formel F26 *Ue*, *R* und *C* bekannt sind, so ist die Ausgangsspannung *Ua* der Zeit *t* direkt proportional.

Das „Atemmeßgerät“ wird nach Bild 255 aufgebaut (Schaltbild 256). Ein paar Bemerkungen zur Funktion: Vor jeder Messung wird der Control-Schalter auf die Position 2 gestellt und damit der Kondensator entladen, damit die Verhältnisse eindeutig sind (Meßinstrument zeigt 0 an). Sodann wird ohne weiteres Zögern tief Luft geholt, der Control-Schalter auf 1 gestellt und gleichzeitig die Luft angehalten. Der Control-Schalter bleibt nun solange auf Position 1, bis man wieder atmen muß. Jetzt muß sofort das Instrument abgelesen werden: mit unseren Bauteilewerten entspricht (rein rechnerisch) ein Skalenteil (also 1V Ausgangspannung) etwa 10 Sekunden. In der Praxis haben wir etwas mehr

Bild 256. Schaltung für „Atemakrobatik“

Bild 255. Aufbau zu Schaltung 256

ermittelt; das liegt an der Toleranz der Bauteile – insbesondere der Elko von 100µF kann eine wesentlich höhere Kapazität haben als angegeben (bis zu 50% mehr!).

Zugegeben: Stoppuhren und Digitalzähler, die heutzutage fast zur Standardausrüstung einer Armbanduhr oder eines Taschenrechners gehören, leisten wesentlich mehr an Genauigkeit. Aber darum ging es uns gar nicht. Wir wollten ja in erste Linie das Verhalten eines Integrators studieren!

19.10 Zwei Verstärker in einem Haus: das Verstärker-Modul

Mit den gerade erworbenen Kenntnissen über Operationsverstärker kann jetzt ein erneuter Blick in das Innere des Verstärker-Moduls gewagt werden. Bild 257 zeigt, warum wir es als einen Fehler bezeichnen würden, wenn man den Integrierten Schaltkreis TBA 820 (oder entsprechende Typen), der das Herz des Verstärker-Moduls darstellt, schlichtweg als Operationsverstärker ansieht (in manchen Publikationen wird das leider getan). Man erkennt, daß dieser Integrierte Schaltkreis in Wirklichkeit aus einem Operationsverstärker mit einem nachgeschalteten Gegentaktverstärker besteht (Gegentaktverstärker siehe Kapitel 22.8). Im Innern des IC ist ein Rückkopplungswiderstand von 6kΩ vom Ausgang des Endverstärkers auf den invertierenden Eingang des Operationsverstärkers geschaltet, die Rückkopplung ist somit nicht mehr frei wählbar. Der Endverstärker hat außerdem die Fähigkeit, die Versorgungsspannung zu „symmetrieren", d.h. auf halbe Versorgungsspannung zu gehen, wenn an den nichtinvertierenden Operationsverstärker-Eingang die negative Batteriespannung angelegt wird (er benötigt diese Eigenschaft, um von Sinusspannungen schön gleichmäßig die positiven und negativen Halbwellen verstärken zu können).

Bild 257. Ein Blick in das Innere des Verstärkermoduls

Bild 258 zeigt in nun etwas abgewandelter Form die einfache, von uns bereits vielfach verwendete Verstärkerschaltung mit dem maximal möglichen Verstärkungsfaktor von 5000. Wir können jetzt verstehen, daß der Gesamtverstärker in nichtinvertierender Schaltung betrieben wird – läßt man den Kondensator weg, so ist der Verstärkungsfaktor gleich eins; das Ganze läuft dann als Impedanzwandler (siehe Kapitel 19.4). Mit Kondensator allerdings haben wir es mit einem Wechselspannungsverstärker zu tun, der Kondensator stellt für Wechselströme einen bestimmten Widerstand dar, und unsere Verstärkerschaltung ähnelt in verblüffender Weise der Anordnung von Bild 246.

Bild 258. Der Eingangsoperationsverstärker des Verstärkermoduls wird in nichtinvertierender Schaltung betrieben.

Der Trick des Verstärkermoduls liegt also darin, daß der Verstärkungsfaktor durch die Beschaltung mit einem Kondensator für Gleichspannungen gleich eins, für Wechselspannungen jedoch bis zu 5000 betragen kann. Durch Hinzufügen eines Reihenwiderstandes zum Kondensator kann die Wechselspannungsverstärkung nach Wunsch zudem noch gedrosselt werden.

Nach diesen Ausführungen sollte man noch einmal einen Blick auf Tabelle 5 werfen; man wird vieles nun erklärlich finden, was zuvor nur experimentell ermittelt werden konnte.

20. Meßtechnik – 2.Teil

20.1 Elektronische Chirurgie

Herzchirurgen legen eine Bypass um eine Ader, die den vollen Blutstrom nicht mehr verkraften kann. Wir wollen den Strom, der für unser Meßgerät zu viel wäre, an ihm vorbeileiten. Dazu legen wir parallel zu ihm einen Widerstand als „Bypass". Nicht nur Chirurgen, auch Elektroniker bedienen sich oft englischer Fachausdrücke; ein derartiger Parallelwiderstand wird in der Fachsprache „shunt" genannt (sprich schant). Wir „shunten" das Meßgerät also mit einem Nebenwiderstand, wie es Bild 259 zeigt.

I_{max} = 0,1mA

R_N I_N I_{max} = 0,1mA + I_N

Bild 259. Das Meßinstrument verträgt höchstens einen Strom von 100 µA, bei größeren Strömen muß ein Teil an ihm vorbeigeleitet werden.

R 150Ω R 470Ω R 12Ω 120Ω I_{max} = 1mA

R 12Ω I_{max} = 10mA

R 1,2Ω I_{max} = 100mA

Bild 260. Shuntwiderstände für verschiedene Meßbereiche

Wie groß muß dieser shunt sein?
Das Meßinstrument verträgt nicht mehr als 100µA. Soll ein Strom von z.B. 100mA gemessen werden, so muß der Rest – also 99,9mA – an ihm vorbeifließen. Bild 260 zeigt rechts die erforderliche Stromverzweigung.
Die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände (Formel F21). Das Verhältnis von Shunt-Strom zu Meßstrom ist ziemlich genau 1000:1; das Verhältnis der Widerstände muß also 1:1000 betragen.
Das Meßinstrument hat einen Widerstand von 1200Ω, der Shuntwiderstand muß also 1,2Ω Widerstandswert haben. Sinngemäß verfährt man bei der Ermittlung des Shuntwiderstandes für andere Meßbereiche (Bild 260, linke Darstellungen).

20.2 Echte Laborarbeit: Kennlinienaufnahme

Kennlinien sind für den Elektroniker das A und O, und sie spielen auch im Umgang mit Transistoren eine wesentliche Rolle. Im Gegensatz zu den Widerständen und Dioden hat ein Transistor drei Anschlüsse und vier Kenngrößen, die sein Verhalten beschreiben:
Den Kollektorstrom I_c, den Basisstrom I_b, die Kollektor-Emitterspannung U_{ce} und die Basis-Emitterspannung U_{be}.
Es ist sinnvoll, drei dieser Größen in einem gemeinsamen Diagramm darzustellen; dabei ergibt sich jedoch nicht nur eine Kennlinie, sondern eine ganze Kennlinienschar.
Wir wollen das sogenannte Ausgangskennlinienfeld aufnehmen, das die Beziehungen zwischen dem Kollektorstrom und der Kollektor-Emitterspannung bei verschieden großen Basisströmen darstellt. Sodann werden wir sehen, wie man durch Einzeichnen der Grenzleistungshyperbel und einer Arbeitsgeraden in ein Kennlinienfeld die optimale Arbeitsweise (Arbeitspunkt) eines Transistors festlegen kann.

Bild 261 zeigt den Aufbau der Meßapparatur, Bild 262 das zugehörige Schaltbild. Das gestrichelt umrandete Kästchen mit dem Operationsverstärker dient hier als variable Spannungsquelle von 0 bis ca. +3V für die Transistorschal-

tung. Da uns nur ein Meßgerät zur Verfügung steht, muß es für die Aufnahme jedes Meßpunktes nacheinander zwei Funktionen erfüllen: Strommessung und Spannungsmessung.

Das Rezept für die Kennlinienaufnahme sieht so aus:

1. Brücke Br herausziehen, Meßinstrument stattdessen einstecken.
2. Am Poti P2 drehen, bis das Instrument einen Basisstrom von 30µA (3 Skalenteile) anzeigt. P2 nicht mehr verändern.
3. Meßinstrument herausziehen, Brücke wieder einstecken.
4. Meßinstrument an u und v anschließen (Polung beachten!). P1 so einstellen, daß das Meßinstrument U_{ce}=0,1V anzeigt (= 1 Skalenteil; da das Instrument hier mit einem Vorwiderstand von 10kΩ betrieben wird, entspricht dem Vollausschlag eine Meßspannung von 1V!). U_{ce} notieren.
5. Meßinstrument herausziehen und parallel zum 12Ω-Widerstand einstecken – das Instrument zeigt jetzt 1 mA pro Skalenteil an. Wert für I_c ablesen und notieren. Schlägt der Zeiger am rechten Rand an, Instrument parallel zum 1,2Ω-Widerstand anschließen und beachten, daß nun ein Skalenteil 10mA entspricht!
6. Gemäß Punkt 4 nacheinander U_{ce}=0,2V, U_{ce}=0,3V usw. mit P1 einstellen. Für jede Einstellung von U_{ce} Meßinstrument umstecken und gemäß Punkt 5 den zugehörigen Kollektorstrom ablesen und notieren.
7. Entsprechend Punkt 1 einen Basisstrom von 50µA und dann auch noch von 80µA einstellen. Für jeden Basisstromfall die Prozedur 1-6 wiederholen.

Bild 261. Aufbau zu Schaltung 262

Bild 262. Schaltung zur Aufnahme von Transistor-Kennlinien

Wenn wir alles richtig gemacht haben, erhalten wir eine Tabelle, deren Werte in das leere Linienfeld, das wir hier abgedruckt haben, eingetragen eine Kurvenschar ergeben, die etwa der von Bild 263 entspricht.

Geschafft! Es war mühsam, aber es hat sich gelohnt. Unsere Kennlinienschar könnte beinahe dem Datenblatt eines Transistorherstellers entnommen sein.

U_{CE} [V]	I_B=30µA I_C [mA]	I_B=50µA I_C [mA]	I_B=80µA I_C [mA]
0,1	1,5	3	5
0,2	8	10	16
0,3	11	14	20
0,4	12	15	21
0,5	12	16	–
0,6	12	17	–
0,7	12,5	18	–
0,8	12,5	19	–
0,9	12,7	19	–

Bild 263. Selbstaufgenommene Kennlinien; für Messungen in der Nähe des Nullpunktes ist unsere Meßapparatur nicht besonders gut geeignet.

20.3 Über den Umgang mit Transistorkennlinien

Aus dem sogenannten „Ausgangs-Kennlinienfeld“ eines Transistors kann eine Reihe wichtiger Dinge entnommen werden.
Bild 264 zeigt ein Kennlinienfeld, das eine große Anzahl von Kennlinien enthält. Hier wurden außerdem die Grenzleistungshyperbel (225mW nach Werksangabe für den BC 238C) und eine sogenannte Arbeitskennlinie eingetragen. Diese Linie ist für den Kollektorwiderstand („Lastwiderstand“) von 150Ω gültig. Als Batteriespannung wurde in dem Diagramm 4,5V angenommen.

Bild 264. Kennlienienfeld des BC 238 C

Um die Linie zu ermitteln, betrachten wir zwei Grenzfälle:
Fall 1: Kollektorstrom I_C sei 0 (Transistor gesperrt), am Widerstand fällt dann keine Spannung ab, die gesamte Batteriespannung liegt am Transistor, also ist U_{CE} = 4,5V. Dies ergibt den ersten Punkt der Arbeitskennlinie (Punkt F1).
Fall 2: Die gesamte Batteriespannung liegt am Widerstand, der Transistor ist ideal leitend, also U_{CE}=0. Somit fließt durch den Lastwiderstand der maximal mögliche Strom von
Batteriespannung : Lastwiderstand = 4,5V : 150Ω = 30mA
Jetzt erhält man den zweiten Punkt der Geraden (Punkt F2). Zwischen den beiden Grenzwerten F1 und F2 sind alle Zwischenwerte möglich, da sich die Versorgungsspannung nur in einem bestimmten Verhältnis zwischen Spannung am Lastwiderstand und Spannung am Transistor aufteilen kann. Da, wo die Arbeitsgerade die Transistorkennlinien schneidet, sind Arbeitspunkte für den Transistor möglich.
Sie geben an, welche Werte bei gegebenem Lastwiderstand Kollektorstrom, Basisstrom und Kollektor-Emitterspannung einnehmen können. Für A1 gilt beispielsweise: Bei einem Basisstrom von 25µA fließt ein Kollektorstrom von 15mA, und die Kollektor-Emitterspannung beträgt 2,25V. Am Lastwiderstand liegt dann ebenfalls eine Spannung von 2,25V (Versorgungsspannung wird in zwei gleichgroße Anteile aufgeteilt). Ändern wir den Basisstrom (Arbeitspunkte A2 und A3), so ändern sich auch Kollektorstrom und Kollektor-Emitterspannung.

21. Digitaltechnik – auf dem Wege zum Computer

Die Begriffe „analog“ und „digital“ wurden bereits im Zusammenhang mit dem Operationsverstärker erwähnt, und dem Unterschied soll nun auf den Grund gegangen werden.
Betrachten wir eine Bahnhofsuhr mit Sekunden-Minuten- und Stundenzeiger: üblicherweise bewegt sich der Sekundenzeiger mit gleichmäßiger Geschwindigkeit über das Ziffernblatt; er zeigt das Verstreichen der Sekunden ohne zu stocken kontinuierlich an; diese Art der Anzeige nennt man **analog**. Anders der Minutenzeiger: jedesmal, wenn der Sekundenzeiger eine Umdrehung absolviert hat, springt der Minutenzeiger um einen Wert weiter; halbe oder gar Viertelminuten kann er nicht anzeigen. Eine solche Darstellung eines Meßwertes heißt **digital**.
Digital kommt vom lateinischen Wort „digitus“, zu Deutsch: Finger. Mit den Fingern zählt man **ganze** Werte ab (beispielsweise: **1**Mark – **2**Mark – **3**Mark...), nicht aber 1,23 – 2,25 – 3,12 ... Mark.
Nehmen wir unser Meßgerät als zweites Beispiel: es hat eine analoge Anzeige, der Zeiger bewegt sich bei stetig ansteigender Spannung absolut gleichmäßig über die Skala. Bleibt er zwischen zwei Skalenstrichen stehen, so müssen wir den Anzeigewert schätzen. Je größer die Skala und je besser das Meßwerk ist, desto genauer kann die Schätzung sein. Ein digitales Meßinstrument hingegen liefert uns als Ergebnis

einen Meßwert direkt in Ziffern; bei stetig ansteigender Spannung springt die Anzeige fortlaufend um einen ganzen Zahlenwert in der letzten Stelle weiter. Zwischenwerte können nicht ermittelt werden. Bild 265 zeigt diese Verhältnisse in einem sehr einfachen Beispiel.

0,75

0,8

2,25

2,3

Bild 265. Analoge und digitale Anzeigen

21.1 Meßverfahren mit Vor- und Nachteilen

Man kann weder der analogen noch der digitalen Anzeige in allen Lebenslagen uneingeschränkt den Vorzug geben, beide haben für bestimmte Anwendungsfälle ihre Berechtigung. Werfen wir einen Blick auf die analog anzeigende Aussteuerungskontrolle eines Cassettenrecorders: trotz des schnell wechselnden Zeigerausschlages erhalten wir eine gut erfaßbare Information, ob die Aufnahmeempfindlichkeit richtig eingestellt ist. Ein Digitalgerät würde hier nur ein Flimmern von Zahlen ohne wirkliche Aussage bringen.
Digitalgeräte sind dann von Vorteil, wenn das Abschätzen von Zwischenwerten als lästig empfunden wird und zu Fehlablesungen führen kann. Ihr entscheidender Vorteil liegt aber in der Möglichkeit, die Meßwerte über größere Entfernungen fehlerfrei zu übertragen und sie durch einen Computer erfassen und weiterverarbeiten zu lassen.
Diese Vorbemerkungen über verschiedene Meßverfahren waren erforderlich, um die Unterschiede zwischen „analog" und „digital" deutlich zu machen. Wir wollen uns jetzt mit der „Logik" beschäftigen, die allen heute gebräuchlichen Computern zugrunde liegt.

Wer sich für Computer interessiert, sollte sich unbedingt den KOSMOS-Computer in einem Fachgeschäft für Spiel und Hobby ansehen. Die in diesem Experimentierbuch vermittelten Kenntnisse über die Digitaltechnik werden bei einer Beschäftigung mit dem Computer besonders nützlich sein.

21.2 Gatter – nicht nur auf dem Bauernhof

Das Grundelement eines Computers trägt den seltsamen Namen „Gatter". Dies ist die Übersetzung des englischen Wortes „gate", und es gibt natürlich Puritaner der deutschen Sprache, die verbissen darauf beharren, daß stattdessen das Wort „Tor" verwendet wird. In der Fachsprache der Computerleute sind aber für viele Begriffe weitaus schlechtere Übersetzungen gang und gäbe, das Wort „Gatter" hingegen beschreibt nach unserer Meinung ganz gut die Funktion, um die es hier geht, und deshalb wollen wir im folgenden auch bei diesem allgemein üblichen Begriff bleiben.
Ein Gatter verarbeitet „logische" Werte. Nicht etwa, daß alles andere unlogisch wäre, hier geht es um eine Logik spezieller Art – die Möglichkeit, auch die kompliziertesten Rechnungen mit den Werten „0" und „1" durchzuführen.
Das ist die Grundidee: man läßt nur zwei Zustände zu, z.B.

Spannung oder keine Spannung
Strom oder kein Strom
LED leuchtet oder LED leuchtet nicht
hoch (engl. High) oder niedrig (engl. Low)

und ordnet dem einen Zustand eine „1" (Spannung vorhanden, Strom fließt, LED leuchtet, High) und dem anderen Zustand eine „0" (keine Spannung, kein Strom, LED leuchtet nicht, Low) zu und versteigt sich zu der „verrückten" Idee, daß 1 „wahr", 0 hingegen „unwahr" sei. Folgerichtig kann man dann für ein Gatter eine **Wahrheitstabelle** anfertigen, in die man alle

Antworten auf die Frage „Was passiert wenn..?“ einträgt.

21.3 Was passiert wenn...

...bei der Logikbox in Bild 266 beide linke Eingangsschieber unten (unten=LOW, abgekürzt L) sind? Man sieht es: Die LED brennt, weil der rechte Teil des Schaltbrettes nach oben (oben=HIGH, abgekürzt H) geklappt ist.
...ein Eingangsschieber nach oben (auf H) geschoben wird? Es ändert sich nichts, weil das Schaltbrett durch den anderen Schieber gehalten wird; der Ausgang bleibt auf H.
...wenn man die Positionen der beiden Eingangsschieber gegeneinander vertauscht, einen also wieder herunter- (auf L), den anderen dafür aber herauf- (auf H) schiebt? Wieder passsiert nichts, der Ausgang bleibt auf H.
...wenn man beide Eingangsschieber nach oben (auf H) schiebt? Nun endlich geht die LED aus, weil das Schaltbrett frei ist und sein rechter Teil nach unten (auf L) klappt.

Für unsere Logikbox, die ein sehr anschauliches Modell für ein sogenanntes **UND-NICHT-Gatter** ist, wurden in die Tabelle Bild 267 minutiös alle gemachten Beobachtungen eingetragen. Statt H und L hätten wir auch wahr und unwahr oder aber auch 1 und 0 schreiben können. Elektroniker bevorzugen H und L, weil sie damit die Vorstellung „hoch = Spannung vorhanden“ und „niedrig = 0V bzw. keine Spannung vorhanden“ verbinden.

21.4 Das Digitalmodul : Vier UND-NICHT-Gatter

Nach so viel grauer Theorie schreiten wir nun endlich zur Praxis und widmen uns unserem Digitalmodul, das erfreulicherweise gleich vier UND-NICHT-Gatter in sich beherbergt. Die aufgestellte Wahrheitstabelle kann anhand von Aufbau 270 überprüft werden, wenn wir vereinbaren, daß ein gedrückter Taster HIGH und ein ungedrückter Taster LOW entsprechen soll. Wir beobachten die LED zunächst bei ungedrückten Tastern, betätigen dann nur den einen und anschließend nur den anderen und zum Schluß beide gleichzeitig.

Eingangsschieber 1	Eingangsschieber 2	Schaltbrett
LOW	LOW	HIGH
HIGH	LOW	HIGH
LOW	HIGH	HIGH
HIGH	HIGH	LOW

Bild 267. Wahrheitstabelle eines UND-NICHT-Gatters

Bild 268 zeigt das Schaltsymbol eines UND-NICHT-Gatters: Es hat zwei (Logik-) Eingänge, die wir mit E1 und E2 bezeichnen und einen (Logik-) Ausgang, der mit einem A versehen ist.

Bild 268. Schaltsymbol für UND-NICHT-Gatter

Bild 266. Logik-Box eines UND-NICHT-Gatters

Bild 269. Das KOSMOS Digitalmodul

Achtung! Durch falschen Anschluß (+ und – vertauscht) wird das Digital-Modul sofort zerstört.

Bild 270. Aufbau zu Schaltung 271

Anmerkung: Bei allen Schaltbildern mit Digitalmodul sind aus Gründen der Übersichtlichkeit die Stromversorgungsleitungen zur Batterie nicht eingezeichnet. In den entsprechenden Aufbaubildern hingegen sind sie selbstverständlich berücksichtigt.

Schaltbild 271 gibt Aufschluß, wie wir für die Eingänge die Zustände H und L erzeugen: jeder Eingang ist über einen Widerstand mit Minus verbunden, d.h. bei nichtgedrücktem Taster liegt 0V an ihm (er befindet sich also auf „Low"). Das Betätigen eines Tasters bewirkt, daß der jeweilige Eingang direkt mit Plus verbunden wird (er befindet sich dann auf „High").

Bild 271. Prüfschaltung für ein UND-NICHT-Gatter

Wozu dient der Transistor?

Unser Digitalbaustein ist in moderner CMOS-Technik hergestellt (CMOS – sprich: Zee-Moss – ist die Abkürzung von **C**omplementary **M**etal

Oxide **S**ilicon = Komplementäre Metalloxid-Siliziumtechnik. Dies ist ein spezielles Halbleiter-Herstellungsverfahren, das von dem der gängigen Transistoren, unserem OP oder dem Verstärker-Modul erheblich abweicht). Elektronik-Bauteile in CMOS-Technik sind besonders sparsam im Stromverbrauch. Mit Bruchteilen von Milliampere sind sie an ihren Eingängen zur Funktionssteuerung zufrieden. Leider ist aber auch der Ausgang knickrig mit der Stromabgabe, so daß zum Betrieb einer Leuchtdiode stets ein Stromverstärker nachgeschaltet werden muß.

21.5 Praxis-Beispiel für UND-NICHT-Gatter

Was fängt man in der Praxis mit einem solchen Gatter an? (Es wird übrigens im Englischen NAND-gate als Abkürzung von NOT-AND-gate genannt).
Wir stellen uns folgenden Fall vor: Ein Straßenbahnwagen hat vorn und hinten Türen, die vom Fahrer überwacht werden müssen. An jeder Tür ist ein Kontakt eingebaut, der geschlossen ist, wenn die Tür zu ist, und offen ist, wenn die Tür aufgemacht wird. Über ein Kontrollämpchen kann der Fahrer vor der Abfahrt überprüfen, ob beide Türen ordnungsgemäß verschlossen sind: Das Lämpchen brennt nur dann **nicht**, wenn Kontakt 1 **und** Kontakt 2 betätigt sind. Das Schließen eines Kontaktes reicht nicht, um die Kontrollampe zum Verlöschen zu bringen. Man erkennt jetzt die Logik der UND-NICHT-Schaltung: Zwei Bedingungen müssen erfüllt ("wahr") sein, damit ein Ereignis **nicht** eintritt.

21.6 Ein Digital-Puzzle

Wir sollten uns jetzt ein wenig entspannen und ein Puzzlespiel mit UND-NICHT-Gattern veranstalten. Eine Knobelschaltung mit 4 Gattern zeigt Bild 273: fünf Eingänge stehen zur Verfügung – welche müssen wir auf High und welche auf Low legen, damit der Ausgang auf High geht?
Die Lösung kann durch ein paar Minuten Kopfarbeit leicht gefunden werden, für Praktiker schlagen wir in Bild 272 einen Aufbau vor, mit dessen Hilfe die 32 (!) Möglichkeiten ausprobiert werden können. Die gestrichelten Linien geben an, an welchen Stellen Drahtbrücken eingesteckt werden können, wenn man den betreffenden Eingang auf High legen möchte. Eine eingesteckte Drahtbrücke bedeutet also High, und eine nicht eingesteckte Drahtbrücke bedeutet Low (dieses Verhalten wird wieder durch Widerstände erreicht, die von den Eingängen nach Minus geschaltet sind – man nennt sie **Pull-down-Widerstände**, frei übersetzt „Runterzieh-Widerstände"). Übrigens: Es gibt 17 Eingangskombinationen, bei denen der Ausgang auf High geht.

Bild 273. Ein Digital-Puzzle

Bild 272. Aufbau für Schaltung 273

21.7 Vom Digital-Puzzle zum Code-Schloß

Natürlich kann man einer solchen Spielschaltung auch eine nützliche Seite abgewinnen. Sie eignet sich hervorragend dazu, einen Safe (es kann aber auch die Zimmer- oder Schranktür sein) elektronisch zu sichern. Statt der LED mit ihrem Vorwiderstand wird ein Relais angesteuert (z.B. das KOSMOS Netzschaltgerät X, siehe Ende des Buches), das über seinen Schaltkontakt einen elektrischen Türöffner betätigt. Der Türöffner tritt nur dann in Aktion, wenn am Eingang eine der richtigen Kombinationen von High- und Low-Werten anliegt.
Experimentieranregung:
Sollte von einer unbefugten Person der Code jemals „geknackt“ worden sein, so ist es ein leichtes, die Schaltung für andere Kombinationen umzubauen. Es gibt eine Fülle von Schaltungsmöglichkeiten...

21.8 Gatter als Inverter

Der Begriff „invertieren“ ist uns von den Transistor- und OP-Schaltungen sicher noch geläufig. Ein Gatter-Inverter invertiert „logisch“: eine „1“ am Eingang hat eine „0“ am Ausgang und eine „0“ am Eingang eine „1“ am Ausgang zur Folge (oder: High wird zu Low und Low wird zu High).

Verbindet man die beiden Eingänge eines UND-NICHT-Gatters miteinander und benutzt sie als **einen** gemeinsamen Eingang, so ist der Inverter bereits fertig. Bild 274 zeigt links, daß es für Inverter ein eigenes Schaltsymbol gibt (Bausteine, die fertige Inverter mit je einem Ausgang und Eingang haben, sind durchaus handelsüblich), wir werden im folgenden jedoch die rechte Darstellungsweise benutzen, um nicht aus den Augen zu verlieren, daß unsere Inverter aus UND-NICHT-Gattern entstanden sind.

Bild 274. Schaltsymbol für Inverter

Bild 275. Aufbau zu Schaltung 276

Bild 276. Eine Kette aus drei Inverterstufen

Wir können uns mit eigenen Augen von der Umkehr-Funktion überzeugen, wenn wir die Kette aus drei Invertern nach Bild 275 aufbauen. Eine „1" am Eingang (Taste gedrückt) hat am Ausgang des ersten Inverters eine „0" (LED1 dunkel), am zweiten Ausgang eine „1" (LED2 brennt) und am dritten wieder eine „0" (Meßinstrument zeigt 0V) zur Folge. Genau umgekehrte Zustände ergeben sich, wenn der Taster nicht gedrückt wird. Bild 276 zeigt die zugehörige Schaltung.

21.9 UND-Gatter durch Logikwandel

Inverter erweisen sich als ausgesprochen nützlich, wenn man mit der Logik des UND-NICHT-Gatters unzufrieden ist. Das kann z.B. bei folgendem Problem der Fall sein: Eine schwere Presse für Auto-Karosserieteile wird von einem Arbeiter bedient. Um Arbeitsunfälle auszuschließen, kann sich die Presse nur dann herabsenken, wenn der Arbeiter nach dem Einlegen des Werkstückes zwei seitlich angebrachte Hebel mit der rechten und der linken Hand betätigt.
Die Logik eines UND-NICHT-Gatters versagt hier offensichtlich: Es soll jetzt ein Ereignis gerade dann eintreten, wenn die eine Bedingung (linker seitlicher Hebel gedrückt) **und** die andere Bedingung (rechter seitlicher Hebel gedrückt) erfüllt sind. Diese Verknüpfung besorgt ein UND-Gatter. Man sieht sofort, daß die UND-Funktion die logische Umkehrung der UND-NICHT-Funktion ist, und erkennt auch gleich den Nutzen eines Inverters: Ein UND-NICHT-Gatter mit nachgeschaltetem Inverter ergibt ein **UND-Gatter** (engl. AND-gate). Seine Wahrheitstabelle ist in Bild 277, sein Schaltzeichen in Bild 278 dargestellt. Um das Verständnis abzurunden, zeigt Bild 279 die schon bekannte Logikbox für den Fall des UND-Gatters.

E_1	E_2	A
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

Bild 277. Wahrheitstabelle eines UND-Gatters

Bild 278. Schaltsymbol für UND-Gatter

Wir wollen an dieser Stelle eine kleine Anmerkung einschieben und eine Frage beantworten, deren Berechtigung wir durchaus anerkennen müssen: warum wurde nicht zuerst das UND-Gatter vorgestellt (wie es sonst in Lehrbüchern üblich ist, weil seine Logik zunächst plausibler erscheint), und dann daraus das UND-NICHT-Gatter entwickelt? Nun, wir haben mit Bedacht für diesen Experimentierkasten einen Baustein mit UND-NICHT-Gattern ausgewählt, weil man aus ihnen auch andere Gattertypen zusammensetzen kann. Und da erschien es uns sinnvoll, mit einem „einfachen" und nicht mit einem „zusammengesetzten" Gatter zu beginnen. Ende der Zwischenbemerkung. –

Bild 279. Logikbox eines UND-Gatters

Bild 281. Prüfschaltung für ein UND-Gatter

Bild 280. Aufbau zu Schaltung 281

Die Funktion des UND-Gatters sollte auf jeden Fall nach Aufbaubild 280 ausprobiert werden (Schaltbild 281). Auch hier gilt wieder: nicht gedrückter Taster = logisch „0“am Eingang, gedrückter Taster = logisch „1“am Eingang.

21.10 Kleine Logeleien

Nicht gerade als spannendes Gesellschaftsspiel, aber vielleicht doch als eine vergnügliche Art, die kleinen grauen Gehirnzellen in Aktion zu setzen, sind die folgenden Aufgaben gedacht. Vier verschiedene Gatterschaltungen präsentieren wir in den Bildern 282 bis 285. Wer trägt die richtigen Werte in die zugehörigen Wahrheitstabellen ein?

Hinweis 1: Denkfaule, aber praktisch begabte Leute bauen sich die Schaltung auf und finden die Lösungen durch Probieren...

E_1	E_2	A
L	L	
L	H	
H	L	
H	H	

Bild 282. Aufgabe 1: Wie sieht die Wahrheitstabelle aus?

Hinweis 2: Ehe man an den Rand der Verzweiflung gerät, kann man sich die Lösungen anschauen, die am Ende von Kap.21 abgedruckt sind!

E_1	E_2	A
L	L	
L	H	
H	L	
H	H	

Bild 283. Aufgabe 2: Wie sieht die Wahrheitstabelle aus?

E_1	E_2	E_3	E_4	A
L	L	L	L	
L	L	L	H	
L	L	H	L	
L	L	H	H	
L	H	L	L	
L	H	L	H	
L	H	H	L	
L	H	H	H	
H	L	L	L	
H	L	L	H	
H	L	H	L	
H	L	H	H	
H	H	L	L	
H	H	L	H	
H	H	H	L	
H	H	H	H	

Bild 284. Aufgabe 3: Wie sieht die Wahrheitstabelle aus?

E1	E2	E3	E4	A
L	L	L	L	
L	L	L	H	
L	L	H	L	
L	L	H	H	
L	H	L	L	
L	H	L	H	
L	H	H	L	
L	H	H	H	
H	L	L	L	
H	L	L	H	
H	L	H	L	
H	L	H	H	
H	H	L	L	
H	H	L	H	
H	H	H	L	
H	H	H	H	

Bild 285. Aufgabe 4: Wie sieht die Wahrheitstabelle aus?

21.11 Gatter für alle Lebenslagen

Wem es bislang einigermaßen fade erschien, mit viel Aufwand eine logische „1" oder eine logische „0" als Ergebnis zu erhalten, der wird bei den folgenden Beispielschaltungen aus dem Staunen nicht herauskommen, denn die Fähigkeiten von UND-NICHT-Gattern grenzen fast an Hexerei: Oszillatoren, Flipflops, Monoflops, Multiplexer, Spannungsverdoppler... unsere Gatter sind wahre Alleskönner!

21.12 Wie man sich ein Flipflop ergattert

Kommen wir zurück zu dem berühmten Computerelement, dem Speicherbaustein Flipflop – nun aber rücken wir der in der Praxis üblichen Computertechnik ein beträchtliches Stück näher. Speicher in Computern sind grundsätzlich aus Gattern aufgebaut, allerdings finden in einem speziellen Computer-Speicherbaustein von der Größe unseres Vierfachgatters heutzutage Hunderte oder gar Tausende solcher Gatter-Flipflops Platz.

Bei einem Flipflop aus Transistoren hatten wir „überkreuz" jeweils den Kollektor (Ausgang) des einen mit der Basis (Eingang) des anderen verbunden. Wer's nicht mehr weiß, kann sich Schaltung 81 nochmals anschauen. Bei einem Gatter-Flipflop ist die Sache wie bei den Transistoren (Schaltbild 287), und somit brauchen wir uns gar nicht mit langatmigen Erklärungen aufzuhalten. Die verbleibenden Eingänge werden über jeweils einen Inverter mit Tastern verbunden, die hier die Bezeichnungen S (= „**S**et" – Setzeingang) und R (= „**R**eset" – Rücksetzeingang) tragen. Durch Druck auf den Taster S kann das Flipflop also in den einen Zustand gesetzt und durch Betätigen des anderen Tasters wieder zurückgesetzt werden (Aufbau 286). Ein solches Flipflop wird von den Fachleuten **RS-Flipflop** genannt.

Bild 286. Aufbau zu Schaltung 287

Bild 287. Flipflop aus Gattern

21.13 Gatter erzeugen Töne

Auch ein Tongenerator läßt sich „logisch" realisieren. Alles, was man dazu benötigt, sind zwei Inverter, zwei Widerstände und natürlich ein Kondensator (Schaltbild 289). Zum Ausprobieren (Aufbaubild 288) wollen wir uns mit einem Einfachst-Verstärker begnügen (Transistor T1, Ohrhörer), später wird dann für den richtigen „Sound" unser Verstärkermodul herhalten.

Bild 289. Tonerzeugung mit Gattern

Für den Moment, da die Versorgungsspannung angelegt wird, nehmen wir an, daß der Ausgang des linken Inverters auf High und der Ausgang des rechten Inverters entsprechend auf Low liegt. Der Kondensator ist zunächst natürlich vollkommen ungeladen, wird jedoch nun über den Widerstand *R*1 langsam aufgeladen. Hat die Ladespannung einen bestimmten Wert erreicht, so „empfindet" der linke Inverter dies als eine logische „1" an seinem Eingang, die er nun – da er sich ja logisch verhält – in eine „0" an seinem Ausgang invertiert und den rechten Inverter veranlaßt, an seinem Ausgang eine „1" zu produzieren. Der Kondensator wird nun umgeladen: an seinem unteren Anschluß sinkt die Spannung wieder ab, bis sie einen Wert erreicht hat, der für den linken Inverter eine „0" bedeutet. Damit ist der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt, und das Spiel beginnt aufs neue.

Experimentieranregungen:

Für den Kondensator kann der Wert 6,8nF eingesetzt werden. Zur stufenlosen Einstellung der Tonhöhe wird *R*1 herausgezogen und durch das Potentiometer P2 oder durch das Potentio-

NICHT VERGESSEN: 100nF=0,1µF!

Bild 288. Aufbau zu Schaltung 289

meter P1 ersetzt (jeweils nur Schleifer und einen äußeren Anschluß benutzen).

An Punkt A kann über einen 0,1-µF-Kondensator das Verstärkermodul angeschlossen werden (über den Kondensator zum Eingang E; von dort 5,6kΩ nach Minus; Eingang V über einen 10-µF-Kondensator nach Minus; Ausgang über 10µF und Lautsprecher nach Minus).

Das Poti wird wieder abgetrennt bzw.der Widerstand herausgezogen und an u und v zwei lange Drähte angeschlossen. Wenn man die beiden blanken Enden dieser Drähte mehr oder weniger fest anfaßt oder Versuche mit trockenen oder etwas feuchten Händen macht (Prinzip des Lügendetektors), so ändert sich die Tonhöhe.

Für *R*1 und *C*1 werden alle möglichen Werte-Kombinationen ausprobiert.

21.14 Lange Leitung für viele

Wer jemals ein Übersee-Telefonat geführt hat, kann sich sicherlich erinnern, daß er manchesmal den Eindruck hatte, die Leitung sei tot, das Gespräch also unterbrochen worden. Und plötzlich war der Gesprächspartner wieder da, als wäre nichts geschehen. Tatsächlich aber haben sich während der vermeintlichen Unterbrechungen eine Unzahl von elektronischen Ereignissen abgespielt. Da Überseeleitungen teuer – sehr teuer! – sind, müssen sie so intensiv wie irgend möglich genutzt werden. Entsteht während einer Unterhaltung eine (z.B. kleine Verlegenheits-) Pause, so reagiert eine sehr empfindliche Elektronik umgehend und teilt die Leitung einem

Bild 290. Aufbau zu Schaltung 291

anderen Gesprächs-Paar zu, das gerade lautstark „quasselt“. Ist die Gesprächspause beendet, sorgt die Elektronik wieder für eine freie Leitung – z. B. von einem anderen Gesprächs-Paar, das seinerseits gerade eine Pause zum Atemholen einlegt. Auf diese Weise können wenige Leitungen von vielen Leuten gleichzeitig benutzt werden – natürlich ohne, daß einer vom anderen etwas hört. Ein solches ständiges Hin- und Herschalten nennt man **multiplexen**.

Eine ganze Reihe unterschiedlicher Multiplexarten ist bekannt; eine von ihnen ist das **Frequenz-Multiplexverfahren**, bei dem zwei Frequenzen gleichzeitig über eine einzige Leitung übertragen werden, indem in rascher Folge einmal die eine und dann die andere Frequenz auf die Leitung geschaltet wird. Am Empfangsort müssen die beiden Frequenzen (denen man noch einen bestimmten Nachrichteninhalt mit auf die Reise geben kann), wieder voneinander getrennt werden (**demultiplexen**).

Wir bauen einen Multiplexer für zwei Frequenzen nach Aufbaubild 290 auf. Die Drahtbrücke Br wird zunächst **nicht** eingesetzt. Sind alle Verbindungen richtig hergestellt und die Batterie angeschlossen, so wird ein Ton hörbar sein. Er stammt aus dem Oszillator 1 (Schaltbild 291). Jetzt schalten wir auf den Ton von Oszillator 2 um und betätigen dazu den Taster: der höhere Ton des Oszillators 2 erscheint nun auf der Leitung (d.h. bei uns im Ohrhörer).

Wohlgemerkt: Hier wird nicht ein Tongenerator (z.B. durch Einschalten unterschiedlicher Widerstände oder Kondensatoren) zur Erzeugung unterschiedlicher Frequenzen veranlaßt, vielmehr werden die Freqenzen zweier vollkommen voneinander unabhängiger Oszillatoren (Tongeneratoren) durch einen digitalen Multiplexer umgeschaltet.

Bild 291. Multiplexer

Wir gehen noch einen Schritt weiter und automatisieren das Umschalten. Dazu wird die Drahtbrücke Br nun eingesteckt und somit die Verbindung zu einem dritten Oszillator, der die Umschaltfrequenz erzeugt, hergestellt. Das Gezirpe, das der Ohrhörer nun von sich gibt, entsteht aus der raschen Aufeinanderfolge der beiden unterschiedlichen Frequenzen. Bild 292 zeigt diese Verhältnisse nochmal in einem Spannungs-Zeitdiagramm.

Bild 292. Spannungs-Zeit-Diagramm der gemultiplexten Frequenzen

Das logische Verhalten der Multiplexschaltung aus den vier Gatter-Bausteinen kann sich jeder ohne Schwierigkeiten selbst nach der bekannten Methode „Was passiert wenn..." klarmachen; der Rest des Aufbaus besteht aus uns bereits bestens geläufigen Schwingschaltungen. Ein Wort zum Operationsverstärker: der Masse-Mittenpunkt wird hier ausnahmsweise durch zwei 470-Ω-Widerstände erzeugt, die als Spannungsteiler an ihrem Mittenpunkt exakt die halbe Batteriespannung liefern.

21.15 18 Volt mit einer gewöhnlichen 9V-Batterie

Nicht allzu selten stößt ein Elektroniker auf die Schwierigkeit, daß eine bestimmte Schaltung nur mit einer höheren Spannung zufriedenstellend funktioniert. (Eine solche Schaltung werden wir im nächsten Kapitel kennenlernen.) Die einfachste Methode ist natürlich immer, eine zweite Batterie anzufügen, aber das zeugt von Einfallslosigkeit und belastet auf Dauer das Taschengeldbugdet. Tüchtige Ingenieure kennen da einen elektronischen Ausweg und bauen eine Schaltung auf, mit der eine (Gleich-) Spannung verdoppelt werden kann.
Das Prinzip der Spannungsverdopplung ist denkbar einfach: Man pumpt in einen Kondensator ständig Elektronen (Ladung) hinein und versperrt ihnen durch eine Diode den Rückweg. Bei gegebener Kapazität ist die Spannung an einem Kondensator der Ladungsmenge Q proportional.
Als Formel ausgedrückt:

Ladung = Kapazität mal Spannung

(F27) $$Q = C \cdot U \text{ oder} : U = \frac{1}{C} \cdot Q$$

Dieser Zusammenhang ist absolut einleuchtend, denn auch der Druck in einem Reifen ist proportional zu der Menge der Luft, die man in ihn hineinpumpt. Nun braucht man – im Gegensatz zum Reifen – bei einem Kondensator keine Befürchtung zu haben, daß er bei Aufnahme von zu vielen Elektronen platzt (es sei denn, daß der zulässige Spannungswert für den Kondensator überschritten wird); weder die Diode noch der Kondensator selbst sind vollkommen „dicht", so daß sich nach einer gewissen Zeit des Pumpens ein Spannungsgleichgewicht einstellen wird.
Schaltbild 294 zeigt im linken Teil zwei als astabiler Multivibrator betriebene Inverter; sie erzeugen eine Frequenz von etwa 8kHz. Die

Bild 294. Spannungsversdoppler mit Gattern

nachfolgenden, parallelgeschalteten beiden Inverter dienen als „Puffer“ (engl. buffer); aufgrund ihres extrem hohen Eingangswiderstandes garantieren sie einerseits, daß der Multivibrator-Schaltung so gut wie kein Strom entzogen wird (was deren Funktion in Frage stellen würde), ihre parallelgeschalteten Ausgänge sind andererseits in der Lage, mit vereinten Kräften für die nachfolgende Kondensator-Dioden-Schaltung ein paar Milliampere aufzubringen.

So weit – so gut; schauen wir uns den ganz rechten Teil der Schaltung an. An Punkt A tritt die vom Multivibrator erzeugte Rechteckspannung auf – daß sie zuvor invertiert wurde, spielt keine Rolle. Hinter dem Kondensator *C*2 hätten wir eine Wechselspannung zur Verfügung (vergleiche Abb. 77 und 78!), wenn die Diode D1 nicht wäre: diese schließt die negative Halbwelle nun begierig kurz und überläßt die positiven Anteile der Diode D2, die dafür in Durchlaßrichtung geschaltet ist. Nach der oben beschriebenen Methode wird der Kondensator C3 munter vollgepumpt und erreicht – bei einer frischen Batterie als Versorgung – ohne Mühe bis zu 18V. Man kann's mit dem Meßinstrument nachmessen (Aufbau 293), muß jedoch beachten, daß mit den hier gewählten Vorwiderständen zum Meßinstrument (220kΩ parallel zu der Reihenschaltung von 1MΩ und 680kΩ ergibt etwa 200kΩ) der Vollausschlag des Instrumentes nun 20V beträgt, alle angezeigten Werte also mit 2 multipliziert werden müssen (Beispiel: Anzeige 9 Skalenteile – Meßwert beträgt 18V).

Schaltungen dieser Art finden übrigens in Fernsehgeräten zur Erzeugung der für die Bildröhre erforderlichen Hochspannung Anwendung.

Bild 293. Aufbau zu Schaltung 294

21.16 Rauschgenerator – elektronischer" Schmutzeffekt" nutzbar gemacht

Hifi-Spezialisten führen einen erbitterten Kampf gegen ein Phänomen, das uns die Physik beschert: die Elektronen führen ein zum Teil dickköpfiges Eigenleben und tun nicht immer das, was das Ohmsche Gesetz ihnen vorschreibt. Insbesondere bei höheren Temperaturen verhalten sie sich „statistisch": Durch die Energiezufuhr in Form von Wärme führen sie Bewegungen aus, die nicht vorhersehbar sind. Das äußert sich bei Verstärkeranlagen als das sog. „Rauschen" – ein Geräusch, das aus einer unendlich hohen Vielzahl von Frequenzen zusammengesetzt ist. Jedes Bauteil rauscht, vom einfachen Widerstand bis zum Transistor, und es bedurfte großer Anstrengungen, besonders rauscharme Bauteile zu entwickeln; beispielhaft sollen hier die sogenannten rauscharmen Transistoren für Verstärker-Eingangsstufen genannt werden.

Wir wollen jetzt absichtlich ein möglichst starkes Rauschen erzeugen und machen uns dabei die Tatsache zunutze, daß eine Diode, die man in Sperrichtung betreibt, bei einer genügend hohen Spannung doch leitend wird. Sorgt man aber dafür, daß dieser „Sperrstrom" durch einen in Reihe geschalteten Widerstand sehr klein bleibt, so nimmt die Diode keinen Schaden. Man nennt dies den „Durchbruch" der Diode, und ein kontrollierter Durchbruch (Strom begrenzt) hat die für uns reizvolle Eigenschaft, daß die Vorgän-

Bild 295. Aufbau zu Schaltung 296

ge dabei weitgehend statistisch ablaufen, also von einem starken Rauschen begleitet sind. Schaltbild 296 zeigt einen Rauschgenerator, bei dem wir die Basis-Emitterdiode eines gewöhnlichen Transistors zu Rauschzwecken heranziehen (man erkennt, daß der Kollektor nicht angeschlossen ist). Der Emitter der „Rauschdiode" ist nicht mit der Batteriespannung, sondern mit dem aus dem letzten Kapitel bekannten „Hochspannungsgenerator" verbunden, denn der Durchbruch einer Basis-Emitterdiode erfolgt gewöhnlich erst bei Spannungen oberhalb von 12V.
Den Aufbau des Rauschgenerators zeigt Bild 295 – der im Schaltbild nicht gezeichnete Spannungsverdoppler ist hier mit dargestellt. Nach

Bild 296. Rauschgenerator

Bild 298. Dampflokgeräusch

dem Einschalten der Versorgungsspannung wird P2 langsam verdreht, bis ein kräftiges Rauschen hörbar ist. Ein eventuell gleichzeitig auftretendes hohes „Fiepen“ sollte uns dabei nicht stören; dies rührt vom astabilen Multivibrator her, dessen emsige Arbeit sich auch dem Rest der Schaltung mitteilt.
Wozu kann Rauschen nützlich sein? Dieser Frage wollen wir in den nächsten beiden Kapiteln nachgehen.

21.17 Rauschender Transistor – rauchende Dampflok

Modellbahner schätzen einen möglichst naturgetreuen Betrieb ihres Lieblingsspielzeugs, und dazu gehört natürlich auch, daß die winzigen Lokomotiven genauso ächzen und fauchen wie ihre großen Vorbilder. Die Elektronik steht auch hier wieder hilfreich zu Diensten und liefert Geräusche nach Maß – wenn man großzügig ist und das Rauschen als Zischen und Fauchen der Lokomotive akzeptiert.
Der Rauschgenerator wird entsprechend Bild 298 etwas umgebaut: Die positive Versorgungsspannung des Digitalmoduls wird auf den Kollektor eines pnp-Transistors geführt, der über einen astabilen Multivibrator (mit dem OP realisiert) ein- und ausgeschaltet wird. Die Geschwindigkeit der Lok kann mit P1 stufenlos eingestellt werden (Aufbau 297).
Experimentieranregungen:
Der 470-µF-Kondensator *C*5 wird herausgezogen; es ergibt sich ein anderes Klangbild.

Bild 297. Aufbau zu Schaltung 298

Der 6,8-nF-Kondensator *C*1 wird durch einen 0,1-µF-Kondensator ersetzt; eine leichte Klangveränderung wird bemerkbar sein.

21.18 Rauschen im Rhythmus: Ein elektronisches Schlagzeug

Der Rauschgenerator wird einem weiteren Anwendungszweck zugeführt: ein elektronisches Schlagzeug ensteht, wenn die Drahtbrücke Br herausgezogen und der in Aufbau 298 gestrichelt eingezeichnete Taster eingesetzt wird. Rhythmisches Betätigen des Tasters erzeugt nun ein Geräusch, das einem Schlagzeug sehr ähnlich ist.

Experimentieranregungen:

Die Änderungsvorschläge aus dem letzten Kapitel können auch hier ausgeführt werden.

21.19 Gatterverzögerung – Monoflop durch Logik

Wir könnten unsere Behauptung, Gatter seien wahre Alleskönner, kaum aufrecht erhalten, wenn mit ihnen nicht auch eine der klassischen Schaltungen der Elektronik, das Monoflop, verwirklicht werden könnte. Was man für eine bestimmt Zeitdauer ein- und dann wieder ausschaltet, eine simple Leuchtdiode oder (über das KOSMOS Netzschaltgerät X) eine Vergrößerungslampe im Fotolabor oder eine Treppenbe-

Bild 299. Aufbau zu Schaltung 300

leuchtung oder eine Alarmsirene – überlassen wir der Fantasie jedes Einzelnen. Wir schauen uns die Grundschaltung an – Experimentierfreudige werden sich eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten ausdenken.
Bild 299 zeigt den Aufbau, Bild 300 die Schaltung. In der Ruhestellung ist der Ausgang des Inverters Nr.2 auf High, die Ausgänge des nachgeschalteten Buffers (Inverter Nr. 3) und des Inverters Nr. 1 auf Low. Wird nun der Taster gedrückt, so gelangt auf den Eingang von Inverter 1 ein negativer Impuls, sein Ausgang geht kurzzeitig auf High und befördert dadurch einen positiven Impuls auf den Eingang von Inverter 2, dessen Ausgang zwangsläufig den Low-Zustand einnimmt. Über Inverter 3 leuchtet die LED. Dieser Zustand bliebe nun so erhalten – wenn der Kondensator *C*2 nicht beginnen würde, sich über den Widerstand *R*1 von dem positiven Impuls zu erholen: die Spannung an seinem rechten Anschluß sinkt stetig, bis sie einen Wert erreicht hat, der für den Eingang von Inverter 2 ein Low bedeutet. Sein Ausgang geht wieder auf High, der von Inverter 1 auf Low, und der ursprüngliche Zustand ist wieder hergestellt, die LED geht aus.
Experimentieranregungen:
Für *R*1 und *C*2 können verschiedene Wertekombinationen ausprobiert werden. Es lassen sich Zeiten von mehreren Minuten erreichen – mit den hier vorgeschlagenen Werten beträgt die Einschaltzeit knapp 6 Sekunden.

21.20 Pünktlich wie die Uhr – Zeitzeichengeber

Als (vorläufigen) Abschluß unserer Beispielsammlung für den Einsatz von UND-NICHT-Gattern schlagen wir eine Anlage vor, die in regelmäßigen Abständen einen Piepton erzeugt – so ähnlich, wie wir es vom Radio her kennen, kurz bevor die volle Stunde angesagt wird: tüt – tüt – tüt – .....
Wir verwenden zwei astabile Multivibratoren – einer erzeugt den Piepton, der andere entscheidet durch wesentlich langsameres Schwingen über Einschalt- und Ausschaltdauer des Tones. In Schaltbild 302 erkennt man außerdem einen Taster, der gedrückt werden muß, um den Zeitzeichengeber in Aktion treten zu lassen.
Experimentieranregung:
Statt pnp-Transistor und Ohrhörer kann selbstverständlich auch das Verstärker-Modul für Lautsprecherbetrieb eingesetzt werden.

Bild 302. Alarmtongeber

Bild 300. Monoflop mit Gattern

Bild 301. Aufbau zu Schaltung 302

21.21 Unüberhörbar: Ein Alarmtongeber

Der Eingang E in Schaltbild 302 ist bislang noch nicht zur Sprache gekommen; das soll nun nachgeholt werden. Der unterbrochene Piepton kann für jede beliebige Alarmschaltung eingesetzt werden – z.B. durch Kombination mit dem Kühlwächter nach Kapitel 11.16. Der rechte Teil der Kühlwächter-Schaltung wird fortgelassen und der Kollektor des rechten Transistors mit dem Eingang E unseres Alarmtongebers verbunden. Steigt die Temperatur an, so ertönt ein besonders aufdringliches Alarmsignal.
Experimentieranregungen:
Jede Schaltung, die an ihrem Ausgang ein „High“ produziert, wenn ein bestimmtes Ereignis eintritt, kann mit dem Eingang des Alarmtongebers verbunden werden.

21.22 Aus UND-NICHT wird ODER

Wir wollen weiter „logisch“ bleiben und eine andere Gatterart kennenlernen. Dazu betrachten wir in Gedanken die Innenbeleuchtung eines Autos und überlegen, was passiert, wenn wir zunächst eine der vorderen Türen, dann die andere und schließlich beide gleichzeitig öffnen. Die Lampe der Innenbeleuchtung wird angehen,

Bild 303. Logikbox eines ODER-Gatters

E_1	E_2	A
L	L	L
H	L	H
L	H	H
H	H	H

Bild 304. Wahrheitstabelle für ODER-Gatter

Bild 305. Schaltsymbol für ODER-Gatter

wenn die eine **oder** die andere **oder** beide Türen geöffnet werden. Eine Bedingung oder die andere oder beide müssen erfüllt sein, damit ein Ereignis (Aufleuchten der Lampe) eintritt. Eine solche Verknüpfung nennt man folgerichtig **ODER**-Schaltung (engl. OR-Gate).
Die Logik-Box nach Bild 303 soll wieder das Verständnis unterstützen: Sind beide Eingangsschieber auf Low, so ist das Schiebebrett, das die Ausgangsslampe betätigt, ebenfalls auf Low. Wird nun einer der Eingangsschieber nach oben bewegt, so nimmt er das Ausgangsschiebebrett mit, welches das Lämpchen einschaltet. Das gilt natürlich auch, wenn beide Eingangsschieber oben sind. Die Logik: High an einem Eingang reicht aus, damit der Ausgang ebenfalls auf High geht. Wir haben diese Verhältnisse in die Wahrheitstabelle Bild 304 eingetragen.
Bild 305 zeigt das Schaltsymbol eines ODER-Gatters, und es erklärt auch, wie man sich aus drei UND-NICHT-Gattern ein ODER-Gatter „zusammenbauen“ kann.

Von der Theorie zur Praxis schreiten wir mit einem Prüfaufbau nach Bild 306: Durch Drücken der einen oder der anderen oder beider oder gar keiner Taste können wir den „Wahrheitsgehalt“ der Tabelle in Bild 304 überprüfen. Die zugehörige Schaltung ist in Bild 307 dargestellt.

Bild 307. Prüschaltung für ODER-Gatter

Bild 308. Aufbau zu Schaltung 309

Bild 306. Aufbau zu Schaltung 307

21.23 Auf dem Weltraumbahnhof: Countdown läuft....

...er muß aber leider immer wieder unterbrochen werden, weil die elektronische Überwachung einen Fehler meldet. Nun kann man sich vorstellen, daß es bei den Hunderttausenden oder Millionen von Möglichkeiten eines Defektes nicht für jeden Fehler eine eigene Störungsmeldung gibt, vielmehr sind die Funktionseinheiten gruppenweise zusammengefaßt, so daß eine Alarmauslösung z.B. bedeuten kann: Fehler in Aggregat 1 **oder** in Aggregat 2 **oder** in Aggregat 3.

Wir wollen in einer Überwachungsschaltung drei Bauelemente – zwei Leuchtdioden und die IR-Diode – gleichzeitig überprüfen und immer dann Alarm geben, wenn durch Herausziehen einer Diode der betreffende Stromkreis unterbrochen wird. Dazu wird ein ODER-Gatter mit **drei** Eingängen eingesetzt. Zwei der notwendigen Invertierungen werden von Transistoren übernommen.

Unser Ziel ist: Tritt ein Fehler auf, so muß an einem der drei Eingänge des ODER-Gatters ein High anliegen. Wie man das bewerkstelligen kann, zeigt Schaltbild 309: Wird eine der Leuchtdioden oder die IR-Diode herausgezogen, so springt der betreffende Ausgang A1 oder A2 oder

Bild 309. Automatischer Bauteiletester

A3 von der Diodendurchlaßspannung (die vom Gatter bzw. den Transistoren als Low erkannt wird) auf positive Batteriespannung, logisch also auf High. Der Aufbau erfolgt nach Bild 308.
Ein Schönheitsfehler soll nicht verschwiegen werden: Wenn eine Diode „durchbrennt", also durch Stromüberlastung ständig Durchgang hat, wird kein Fehler erkannt. Eine weitere, aber etwas kompliziertere Elektronik mit Komparatoren könnte jedoch auch diesen Mangel beheben.

E_1	E_2	A
L	L	H
H	L	L
L	H	L
H	H	L

Bild 312. Wahrheitstabelle für ODER-NICHT- Gatter

Bild 314. Prüfschaltung für ein ODER-NICHT-Gatter

Bild 310. Schaltsymbol für ODER-NICHT-Gatter

Bild 311. Logikbox eines ODER-NICHT-Gatters

21.24 ODER negiert ergibt ODER-NICHT

Nach allem was wir bereits wissen, klingt dies wieder einmal absolut logisch, und es gibt auch gleich den Hinweis, was getan werden muß, damit die Logik des ODER-Gatters umgedreht wird: Ihm muß ein Inverter nachgeschaltet werden, der die Aussage des ODER-Gatters negiert.
Zum Ausprobieren sollte die ODER-NICHT-Schaltung nach Bild 313 aufgebaut werden (Schaltbild 314). Ist kein Taster gedrückt, so leuchtet die LED; das Betätigen eines Tasters oder beider bewirkt, daß das Licht erlischt.
Diese Verhältnisse zeigt Bild 310, das auch das Schaltsymbol für das ODER-NICHT-Gatter angibt (engl. NOR-Gate). In Bild 311 finden wir eine entsprechende Logik-Box, die zugehörige Wahrheitstabelle in Bild 312.

Bild 313. Aufbau zu Schaltung 314

21.25 High Society: Das EXCLUSIV-ODER-Gatter

Nicht nur wegen seines snobistischen Namens, sondern auch aufgrund seiner erstaunlichen Eigenschaften verdient ein Gatter besondere Aufmerksamkeit: Das EXCLUSIV-ODER-Gatter (engl. EXCLUSIVE OR-Gate) reagiert an seinem Ausgang immer dann, wenn an seinen Eingängen **gleichartige logische Werte** anliegen. Eine Kombination von High und Low läßt den Ausgang auf High, die Wertepaare High-High und Low-Low hingegen lassen den Ausgang auf Low gehen. Wir haben es hier also mit einer Art „Digitalkomparator" zu tun, und wir werden im nächsten Kapitel mit einem EXCLUSIV-ODER-Gatter ein Gerät aufbauen, das folgerichtig den Namen „Fensterkomparator" trägt (übrigens: mit der Logik des EXCLUSIV-ODER-Gatters haben wir bei der Aufgabe nach Bild 283 bereits Bekanntschaft gemacht!).

Bild 315. Schaltsymbol für EXCLUSIV-ODER-Gatter

E_1	E_2	A
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	L

Bild 316. Wahrheitstabelle für EXCLUSIV-ODER-Gatter

Auf eine Logik-Box wollen wir hier verzichten, da das Modell komplizierter als die Wirklichkeit wäre, und wenden die „Was-passiert-wenn...“-Methode stattdessen auf das EXCLUSIV-ODER-Schaltbild 315 an. Es wird keinerlei Mühe bereiten, die Wahrheitstabelle nach Bild 316 anhand des Schaltbildes zu überprüfen.

21.26 Ein elektronisches Fenster fürs Licht

Schaltungen, bei denen mit anwachsender Spannung ein Komparator kippt, bei weiterer Vergrößerung der Spannung jedoch wieder zurückkippt, nennt man **Fensterkomparator**. Aus dem Spannungsanstieg wird also sozusagen ein „Fenster“ herausgeschnitten, so daß man – anders als beim normalen Komparator – für einen bestimmten **Spannungsbereich** am Ausgang der Schaltung ein Ergebnis bekommt (z.B. Aufleuchten einer LED).

Bild 318. Fensterkomparator

Bild 317. Aufbau zu Schaltung 318

Der Fensterkomparator, den wir hier vorstellen wollen, reagiert auf unterschiedliche Lichtintensitäten (Aufbau 317, Schaltbild 318): Nähert man dem Fototransistor Tf langsam eine Lampe, so geht die LED an; bringt man die Lampe noch näher an Tf, so geht die Leuchtdiode wieder aus. Entfernt man die Lampe wieder von Tf, so läuft der Vorgang in umgekehrter Richtung ab. Bild 319 zeigt dieses Verhalten in einem Diagramm.

Der praktische Nutzen? Nun, ein bestimmter Helligkeitswert kann laufend überwacht werden; sinkt die Helligkeit oder wird sie zu groß, so geht die Anzeige-Lampe aus. Für andere Meßgrößen wie Temperatur, Feuchte, Schall, Spannung, Strom usw. kann das Prinzip dieser Schaltung natürlich ebenfalls Anwendung finden.

Bild 319. Diagramm zum Fensterkomparator

21.27 Agentensichere Reflexions-Lichtschranke

Die Vorteile eines EXCLUSIV-ODER-Gatters können auch in der folgenden Schaltung ausgeschöpft werden. Zunächst jedoch ein paar erklärende Worte zu dem Begriff „Reflexions-Lichtschranke". Sie ist eine Anordnung, bei der der Lichtstrahl niemals direkt empfangen, sondern durch irgendwelche Gegenstände reflektiert wird und dadurch „umgeleitet" auf den Empfänger-Transistor trifft. Sender und Empfänger müssen also nicht mehr räumlich voneinander getrennt aufgebaut werden (Bild 320).
„Agentensicher" heißt unsere Lichtschranke deshalb, weil sie sehr deutlich auf „konspirative" Störungen reagiert: versucht man, sie durch Fremdlicht zu „irritieren" (z.B. indem man das Licht einer Taschenlampe auf sie richtet), so gibt sie einen deutlich hörbaren knarrenden Ton von sich. Ordnungsgemäße Funktion wird nur dann erreicht, wenn die Lichtschranke den Lichtstrahl empfängt, den sie selbst aussendet. Fremdlicht und wechselnde Umgebungshelligkeit werden auf diese Weise stets signalisiert.Um ein ordnungsgemäßes Funktionieren der Reflexionslichtschranke zu gewährleisten, sollte das Experiment zunächst unbedingt in einem abgedunkelten Raum durchgeführt werden!

Bild 320. Schema einer Refelxionslichtschranke

Verantwortlich für die Sicherheit à la James Bond ist in Schaltung 322 das EXCLUSIV-ODER-Gatter: Sind an seinen Eingängen die logischen Signale von Sender und Empfänger gleich, so geht sein Ausgang auf Low, sind sie ungleich (empfanges Licht stimmt nicht mit dem gesendeten Licht überein), so ergibt sich am Ausgang eine Rechteckspannung. Der Komparator-OP wertet dieses Verhalten mit Hilfe des integrierend wirkenden Kondensators *C*3 aus und steuert die Anzeige-LED an.

Inbetriebnahme des Gerätes nach Aufbau 321: Der Fototransistor und die IR-Diode werden so ausgerichtet, wie es Bild 320 schematisch zeigt. Einige Zentimeter vor Fototransistor und IR-Diode wird nun ein weißes Stück Papier gehalten und P1 so verdreht, daß die Leuchtdiode stetig hell brennt. Nun wird in dieser Situation zusätzlich das Licht einer Taschenlampe auf den Fototransistor gerichtet: Es wird das Poti jetzt so eingestellt, daß ein knarrender Ton hörbar ist. Damit ist die Einstellung bereits beendet, und man wird folgende Verhaltensweisen feststellen können: wegen der integrierenden Wirkung des

Bild 322. „Agentensichere" Lichtschranke

Kondensators $C3$ geht die Leuchtdiode verzögert ein und aus; nimmt man das weiße Stück Papier fort und schattet den Fototransistor mit der Hand ab (oder betreibt das Gerät im abgedunkelten Raum), so geht die LED aus; läßt man nun Licht auf den Fototransistor fallen, ertönt das knarrende Geräusch; bringt man ein Stück weißes Papier vor Sender und Empfänger, bleibt die LED stetig brennen; beleuchtet man jetzt zusätzlich den Fototransistor mit Fremdlicht, ertönt wiederum das knarrende Geräusch.
Es läßt sich also eindeutig ermitteln, ob das empfangene Licht mit dem gesendeten übereinstimmt!

Lösungen zu den Aufgaben 1 und 2 aus Kap. 21.10.

E_1	E_2	A
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	H

E_1	E_2	A
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	L

Bild 321. Aufbau zu Bild 322

E_1	E_2	E_3	E_4	A
L	L	L	L	L
L	L	L	H	L
L	L	H	L	L
L	L	H	H	H
L	H	L	L	L
L	H	L	H	L
L	H	H	L	L
L	H	H	H	H
H	L	L	L	L
H	L	L	H	L
H	L	H	L	L
H	L	H	H	H
H	H	L	L	H
H	H	L	H	H
H	H	H	L	H
H	H	H	H	H

E_1	E_2	E_3	E_4	A
L	L	L	L	H
L	L	L	H	H
L	L	H	L	H
L	L	H	H	L
L	H	L	L	H
L	H	L	H	H
L	H	H	L	H
L	H	H	H	L
H	L	L	L	H
H	L	L	H	H
H	L	H	L	H
H	L	H	H	L
H	H	L	L	H
H	H	L	H	H
H	H	H	L	H
H	H	H	H	H

Lösungen zu den Aufgaben 3 und 4 aus Kap. 21.10.

22. Halbleiter mit vier Schichten

Tranistoren mit den Schichtenfolgen n-p-n („npn-Transistoren") sind uns inzwischen bestens geläufig; auch den sogenannten komplementären Typ, den pnp-Transistor mit der Schichtenfolge p-n-p, haben wir bei einigen Experimenten bereits eingesetzt und auch schon erfahren, daß bei ihm alle Spannungen mit umgekehrter Polarität angeschlossen werden müssen (Emitter auf Plus, Kollektor auf Minus, Transistor wird leitend bei Anschluß der Basis über einen Schutzwiderstand an Minus).

Bild 323. Schema und Schaltsymbol einer Vierschichtdiode

Es gibt auch Halbleiter-Bauelemente, die aus vier Schichten mit der Folge p-n-p-n bestehen. Sie sind mit zwei Anschlüssen ausgestattet (dem Anodenanschluß bei der äußeren p-Schicht und dem Katodenanschluß bei der äußeren n-Schicht); man nennt sie **Vierschichtdioden** (Bild 323). Werden diese Dioden in Durchlaßrichtung betrieben (Anode an Plus), so sperren sie zunächst. Erhöht man allerdings die Spannung zwischen Anode und Katode stetig, so wird die Diode plötzlich leitend, sie „zündet" – die zugehörige Anoden-Katodenspannung heißt Zündspannung.

22.1 Die zündende Idee: Der Thyristor

Sieht man an der p-Schicht, die der Katode benachbart ist, einen dritten Anschluß vor, so wird aus der Vierschichtdiode ein **Thyristor**. Dieser dritte Anschluß wird **Gate** genannt; mit ihm kann die Vierschichtanordnung auch unterhalb der Zündspannung zu einem beliebigen Zeitpunkt gezündet werden. Allerdings: Nach erfolgter Zündung kann der Thyristor nicht mehr ohne weiteres „abgeschaltet" werden, denn das Gate ist vollkommen wirkungslos, sobald der Anodenstrom erst einmal fließt. Es reicht also am Gate ein kurzzeitiger „Zündimpuls" aus, um den Leitungsmechanismus in Gang zu setzen; der Anodenstrom versiegt jedoch erst wieder, wenn man ihn durch eine äußere Beschaltung so klein macht, daß er unter den sogenannten „Haltestrom" sinkt. Dann sperrt der Thyristor wieder und ist für eine erneute Zündung über das Gate bereit. Das Schaltsymbol eines Thyristors zeigt Bild 324.

Bild 324. Schema und Schaltsymbol eines Thyristors

Bei den Automobil-Herstellern hat die Idee des Thyristors längst im wahrsten Sinne des Wortes gezündet: Autos, die mit Thyristor-Zündanlagen ausgestattet sind, sind immer häufiger anzutreffen.

22.2 Aus zwei Komplementär-Transistoren wird ein Thyristor

Eine Vierschichtanordnung können wir uns ohne Probleme aus einem npn- und einen pnp-Transistor aufbauen und haben damit eine perfekte Nachbildung eines Thyristors. Bild 325 zeigt das Prinzip einer solchen Schaltung, Bild 326 bringt die praktische Realisierung eines Thyristors (zugehöriges Schaltbild 327). Wird die Batteriespannung eingeschaltet, so bleibt der Thyristor gesperrt, die LED leuchtet nicht. Erst wenn ganz kurz der Gate-Taster gedrückt wird, erfolgt die Zündung, der Thyristor bleibt jetzt leitend und kann nur durch Abschalten der Versorgungsspannung wieder gesperrt werden. Der Widerstand *R*1 sorgt dafür, daß die Anord-

nung durch irgendwelche Störungen nicht unkontrolliert zündet.

Bild 325. Nachbildung eines Thyrsitors mit einem pnp- und einem npn-Transistor

Bild 327. Zündschaltung für einen Thyristor

Bild 326. Aufbau zu Schaltung 327

Experimentieranregung:
Der Kondensator *C*1 wird herausgezogen und die Batteriespannung ein paar Mal ein- und ausgeschaltet. Es kann jetzt passieren, daß der Thyristor ohne einen positiven Impuls am Gate „von selbst" zündet; das liegt daran, daß ein schlagartiges Ansteigen der Anodenspannung einen Zündvorgang auslösen kann. Der Kondensator bewirkt in unserer Schaltung einen „gebremsten" Spannungsanstieg.

22.3 Ein thyristorgesteuerter Zweitblitzauslöser

Fotografen schätzen außerordentlich die Möglichkeit, ohne „Kabelsalat", über den man im Studio ständig stolpert, durch einen Hauptblitz einen Zweitblitz zur zusätzlichen Aufhellung des Motivs automatisch auslösen zu können. Das Licht des Hauptblitzes (der mit der Kamera verbunden ist) fällt auf den Fototransistor der Zweitblitz-Schaltung, der Transistor wird für den Bruchteil von Millisekunden leitend, er gibt einen positiven Impuls auf das Gate, und der Thyristor wird gezündet. Über einen Relaiskontakt – z.B. mit Hilfe des KOSMOS Netzschaltgerätes X – wird der Zweitblitz ausgelöst. Zur Vorbereitung der nächsten Blitzaufnahme wird der Taster nun gedrückt und damit der Thyristor wieder gesperrt.
Bild 329 zeigt das Schaltbild des Zweitblitzauslösers. Zum Aufbau nach Bild 328 benötigt man etwas bastlerisches Geschick, um die Verbindung zwischen Elektronik und Blitzgerät herzu-

stellen; nach unseren Zeichnungen sollte dies jedoch ohne größere Probleme gelingen.

Anmerkung: Bei professionellen Zweitblitzauslösern braucht der Thyristor nicht extra per Tastendruck gesperrt zu werden, da bei diesen Geräten der Blitzkontakt parallel zum Thyristor liegt, beim Zünden des Blitzes die Anodenspannung also praktisch auf Null geht und der Thyristor von selbst sperrt. Allerdings muß dieser dann für eine Sperrspannung von 150...300V geeignet sein, und da unsere Thyristor-Nachbildung nur etwa 40V aushält, müssen wir den Umweg über Relais und Rücksetztaster nehmen.

Bild 329. Zweitblitzauslöser mit Thyristor

Bild 328. Aufbau zu Schaltung 329

22.4 SCR = Silicon Controlled Rectifier

Thyristoren gehören zu der Gruppe der gesteuerten Gleichrichter aus Silizium (engl. **S**ilicon **C**ontrolled **R**ectifier = Gesteuerter Gleichrichter aus Silizium). Gleichrichter heißen sie deshalb, weil sie den Strom (wie eine Diode) nur in einer Richtung passieren lassen, gesteuert werden sie genannt, weil man über das Gate den Zeitpunkt beeinflussen kann, zu dem sie leitend werden sollen.

Wir stellen uns vor, wir würden eine Sinus-Wechselspannung, die natürlich positive und negative Halbwellen hat (Bild 331), auf eine Diode geben (Bild 330). Hinter der Diode wären dann die negativen Halbwellen abgeschnitten, da die Diode ja nur die positiven durchläßt (Bild 332). Eine solche Gleichricht-Wirkung hat ein Thyristor ebenfalls, im ständig gezündeten Zustand könnte man ihn statt der Diode einsetzen.

Bild 330. Stromkreis mit Diode und Lastwiderstand an einer Wechselspannung

Bild 331. Spannungs-Zeitverlauf der Wechselspannung

Bild 332. Spannungs-Zeitverlauf nach Einweggleichrichtung mit einer Diode

Jetzt wollen wir aber das Gate in Aktion treten lassen und selbst entscheiden, wann der Zündvorgang einsetzen soll: Wir fordern beispielsweise, daß der Thyristor erst dann leitend werden soll, wenn die positive Halbwelle ihren Maximalwert (Scheitelwert) erreicht hat. Bild 333 zeigt unsere Forderung in einem Spannungs-Zeitdiagramm: am zunächst gesperrten Thyristor steigt die Spannung an; ist der Scheitelwert erreicht, wird gezündet. Da der Thyristor nun leitend wird, fällt seine Anoden/Katoden-Spannung schlagartig auf die (äußerst geringe) Durchlaßspannung ab. Nähert sich die von außen angelegte Sinusspannung wieder ihrem Nullwert, wird der Haltestrom für den Thyristor unterschritten; er kehrt von selbst in den gesperrten Zustand zurück, und mit der folgenden positiven Halbwelle beginnt das Spiel aufs Neue.

Bild 333. Spannungs-Zeitverlauf am Thyristor

Bild 334. Aufbau zu Schaltung 335

Wie kann ein solches Verhalten durch eine Beschaltung am Gate erreicht werden? Das soll im nächsten Kapitel anhand eines praktischen Beispiels untersucht werden.

22.5 Dimmer mit Phasenanschnitt-Steuerung

Die Technik, einen Thyristor zu einem beliebigen Zeitpunkt des Sinusspannungs-Verlaufes leitend zu machen, nennt man **Phasenanschnitt-Steuerung**. Bild 335 zeigt eine Schaltung dafür. Der Kondensator wird über den Widerstand *R*1 und das Poti P2 bei ansteigender positiver Halbwelle aufgeladen, bis eine Spannung erreicht ist, die am Gate zum Zünden des Thyristors ausreicht; der wird dann leitend, und über das Gate kann sich der Kondensator entladen. Mit P2 wird die Zeitkonstante des Ladevorganges verändert, so daß mit der Potieinstellung sehr genau dosiert werden kann, nach welcher Zeit – vom Beginn der positiven Halbwelle an betrachtet – gezündet werden soll.

Bild 335. Phasenanschnitt-Steuerung

Erfolgt die Zündung gleich nach Beginn der Halbwelle, so fließt im Mittel ein kräftiger Strom, weil der Thyristor für die gesamte Restdauer der Halbwelle leitend bleibt. Wird er hingegen erst kurz vor Ende der Halbwelle gezündet, so ist die Zeit, während der der Thyristor leitend ist, nur kurz und der mittlere Strom entsprechend niedrig.
Bild 336 zeigt ein **Strom**-Zeitdiagramm von den Anschlußbeinen des Widerstandes *R*2, das mit einem Oszilloskop aufgenommen wurde (mit dem KOSMOS-Oszilloskop). Man sieht sehr deutlich, daß der Strom bei Erreichen des Scheitelwertes schlagartig durch den Widerstand (und somit auch durch die Leuchtdiode) zu fließen beginnt. Bei der negativen Halbwelle fließt natürlich kein Strom. Die gestrichelte Linie gibt die Original-Sinuskurve wieder.
Für Diagramm 337 wurde ein **Spannungs-**Oszillogramm an den Anschlüssen des Thyristors (Anode und Katode) aufgenommen. Man erkennt hier, daß die Spannung der positiven Halbwelle zunächst ansteigt, da der Thyristor (noch) gesperrt ist. Dann erfolgt ein steiler Abfall als Zeichen dafür, daß der Thyristor gezündet hat. Die negative Halbwelle erscheint hier nicht, da die Leuchtdiode ebenfalls eine Gleichricht-Wirkung hat.
Für den Aufbau nach Bild 334 benötigen wir eine Sinus-Wechselspannung von etwa 10V, die wir uns am besten aus einem Modellbahn-Trafo (der über einen Wechselspannungs-Anschluß verfügen muß!), einem gewöhnlichen Klingeltrafo oder aus dem KOSMOS Computer-Netzteil besorgen. **Niemals dürfen jedoch Versuche mit den 220V aus der Steckdose gemacht werden!** Die Sinusspannung wird wie gezeichnet angeschlossen und P2 langsam von links nach rechts verdreht. Die LED beginnt zu glimmen, wird dann heller und erreicht schließlich ihre volle Helligkeit.

Das Besondere an diesem einfachen Dimmer ist, daß die Helligkeitseinstellung erfolgt, **ohne daß dabei Leistung in Wärme umgesetzt wird**. Bei allen Steuerungen, die wir bisher kennengelernt haben, wurde beim Verdunkeln der LED Wärme

Bild 336. Strom-Zeitverlauf am Lastwiderstand

Bild 337. Spannungs-Zeitverlauf am Thyristor in Schaltung 335

entwickelt (bei den geringen Strömen, mit denen wir es hier zu tun haben, allerdings nur in ganz geringem Umfang). Bei hohen und höchsten Strömen – z.B. bei der Drehzahlsteuerung von Bahnmotoren – bringt das Verfahren der Phasenanschnitt-Steuerung enorme Vorteile: Es muß Energie nicht vollkommen unnötig „verheizt" werden, und die Kühlprobleme reduzieren sich drastisch. Dieses Gebiet der Elektronik heißt übrigens **Leistungs-Elektronik**.

Dimmer für die Raumbeleuchtung, die alle nach dem Prinzip der Phasenanschnitt-Steuerung funktionieren, sind durchaus handelsüblich; unsere Schaltung stellt also ein lebensechtes Modell für den praktischen Anwendungsfall dar!

23. Verstärker-Klassen für klasse Verstärker

Verstärkerqualitäten werden daran gemessen, wie unverzerrt (wie „rein") eine Sinusschwingung am Ausgang herauskommt. Ist der schöne Sinus verknautscht, so hört sich der Ton für feinfühlige Ohren gräßlich an; dem betreffenden Verstärker sagt man dann einen hohen **Klirrfaktor** nach. Der wird nach einer ziemlich komplizierten Formel berechnet (die wir uns hier deshalb verkneifen wollen) und in Prozent angeben. Wir merken uns, daß gute Verstärker einen möglichst niedrigen Klirrfaktor haben sollten – 0.01% sind heute kein Hexenwerk mehr.

23.1 A-Verstärker

Sinusschwingungen haben – wie wir inzwischen wissen – eine positive und eine negative Halbwelle. Beide Anteile sollen den Verstärker unbeschädigt passieren und verstärkt herauskommen. Es liegt also nahe, den „Arbeitspunkt" auf die halbe Batteriespannung zu legen, damit die Ausgangsspannung immer schön gleichmäßig, von der Mittenspannung ausgehend, nach oben und nach unten schwingen kann. Der im Diagramm 264 eingezeichnete Arbeitspunkt A1 erfüllt diese Bedingung. Ein erweitertes Kennlinienfeld, bei dem ebenfalls der Arbeitspunkt A1 auf halber Batteriespannung liegt, zeigen wir in Bild 338. Außer den aus Bild 264 bekannten Größen sind hier für eine sinusförmige Ansteuerung die Verläufe von Basisstrom, Kollektorstrom und Kollektorspannung eingetragen.

Wenn man sich in Diagramm 338 etwas hineinvertieft, kann man darin lesen wie in einem Bilderbuch. Z.B. erkennt man: Auch wenn der Transistor nicht angesteuert wird (bzw. die sinusförmige Steuerspannung durch Null geht), fließt ein Strom von etwa 15mA, der sog. Ruhestrom. Verstärker dieser Art heißen **A-Verstärker** (oder Verstärker der Klasse A). Bei hohen Leistungen könnte man sie als Heizung für ein mittleres Wohnzimmer einsetzen – allein der Ruhestrom bewirkt eine derartig hohe Energievergeudung in Form von Wärme, daß man auf diese Verstärkerart nur bei ganz bescheidenen Wattzahlen zurückgreift.

Bild 338. Erweitertes Kennlinienfeld eines Transistors; hier wurden auch der Verlauf des Basisstromes, des Kollektostromes und der Kollektorspannung eingetragen.

23.2 Gegentakt-AB-Verstärker

Wesentlich energiesparender wird die ganze Angelegenheit, wenn man sich den Luxus eines Komplementär-Transistors leistet und die Verstärkerarbeit auf zwei Transistoren aufteilt. Bild 339 zeigt das Prinzip: Die Plushalbwellen werden nur vom npn-Transistor verstärkt, der bei positiver werdender Basis leitender wird, die Minushalbwellen werden nur vom pnp-Transistor verstärkt, der bei negativer werdender Basis leitender wird. Wo beide Emitter sich treffen, werden die im „Gegentakt" verstärkten Halbwellen wieder zusammengesetzt.

Im sog. Gegentakt-B-Verstärker fließt ein Kollektorstrom nur, wenn gerade eine Halbwelle verstärkt wird; ohne Ansteuerung sind beide Transistoren gesperrt. Das geht, wenn auf gute Wiedergabe Wert gelegt wird, nur theoretisch. Wegen der Drängung der Kennlinien im Bereich schwacher Basisströme würden die Halbwellen nach der Verstärkung nicht mehr genau zusammenpassen (Übernahmeverzerrungen). Deshalb läßt man durch beide Transistoren auch ohne Ansteuerung etwas Kollektorstrom fließen und spricht dann von **Gegentakt-AB-Verstärkung**. Einen einfachen und leicht zu verstehenden Plattenspieler-Verstärker mit Transistor-Vorstufe in A-Schaltung und Gegentakt-AB-Endstufe zeigt Bild 341, Bild 340 liefert die Anweisungen für den Aufbau. Anzumerken ist, daß bei der Vorstufe der Arbeitspunkt über den Widerstand von der Basis zum Kollektor eingestellt wird. Diese gebräuchliche Schaltungsart („Gegenkopplung") hat den Vorteil einer recht hohen Temperaturstabilität des Arbeitspunktes.

Bild 339. Spannungsverläufe am Gegentaktverstärker

Bild 340. Aufbau zu Schaltung 341

Bild 341. Plattenspielerverstärker mit Gegentakt-AB-Endstufe

23.3 C-Verstärker

Nur der Vollständigkeit halber soll auch noch die dritte Verstärkerklasse, die C-Klasse, erwähnt werden. Man entwickelt hier die Idee des B-Verstärkers fort, geht jedoch noch einen Schritt weiter und unterdrückt den Ruhestrom so stark, daß von einer Sinusspannung nur noch die oberen und unteren Kuppen verstärkt werden. Für bestimmte Anwendungen kann das durchaus erwünscht sein.

23.4 Schaltungsvergleiche

Je nachdem, welchen Anschluß eines Transistors man auf die Schaltungsmasse legt, unterscheidet man Emitter-, Kollektor- oder Basisschaltung (Bild 342). Die Eigenschaften des Transistors sind von Schaltungsart zu Schaltungsart außerordentlich verschieden; in Tabelle 7 haben wir die für die Praxis wichtigsten Kenngrößen aufgelistet.

Bild 342. Transistor-Grundschaltungen

Tabelle 7: Eigenschaften der Transistor-Grundschaltungen

Schaltungsart	Eingangswiderstand	Ausgangswiderstand	Spannungsverstärkung
I Emitterschaltung	mittelgroß (ca. 3 kΩ)	mittelgroß (ca. 50 kΩ)	groß, gegenphasig
II Basisschaltung	sehr klein (ca. 50 Ω)	sehr groß	sehr groß, gleichphasig
III Kollektorschaltung (Emitterfolger)	sehr groß (abhängig von Verstärkung und Lastwiderstand)	sehr klein (ca. 50 Ω)	kleiner oder gleich eins, gleichphasig

24. Gemischte Schaltungen

„Wer vieles bringt, wird manchem etwas bringen..." heißt das Dichterwort (Goethe, Faust), und auch wir haben uns bis hierher bemüht, die wichtigsten Gebiete der Elektronik so vielfältig wie möglich darzustellen. Man darf behaupten: ein „professional" ist jeder, der mit den Bauteilen und Schaltungen, die wir vorgestellt haben, umgehen kann. Und somit ist das Ziel dieses Experimentierbuches erreicht.
Zu Abschluß bieten wir noch buntgemischt ein paar Schaltungen, an denen – so hoffen wir – alle frischbegackenen Elektronikprofessionals Freude haben werden.

24.1 Elektronisch gezwitschert

Elektronische Vögel haben den unschätzbaren Vorteil, daß sie pflegeleicht sind, weder ein Bauer noch Futter benötigen und auch nicht davonfliegen, wenn versehentlich das Fenster einmal geöffnet wird.
Bild 343 zeigt den Aufbau, Bild 344 das zugehörige Schaltbild eines elektronischen Vogelgezwitschers. Wir erkennen zwei astabile Multivibratoren aus je zwei Inverter-Gattern und einen dritten aus einem Operationsverstärker. Die drei erzeugten Schwingungen werden so zusammengemischt, daß dadurch das Vogelgezirpe entsteht. Dabei kann mit dem Aufbau noch

Bild 343. Aufbau zu Schaltung 344

Bild 344. Elektronisches Vogelgezwitscher

munter experimentiert werden, um Grundtonhöhe und Zwitscherklang zu beeinflussen.
Experimentieranregungen:
1. Die Drahtbrücke Br wird zunächst weggelassen; es muß ein gleichbleibender Ton hörbar sein.
2. Die Drahtbrücke wird eingesteckt; der Vogel beginnt nun zu trillern. Mit P1 kann die Tonhöhe verändert werden.
3. Mit einem langen Drahtstück wird eine Verbindung zwischen z und y hergestellt; aus dem Trillern wird ein Zwitschern.
4. Der lange Draht wird bei y herausgezogen und stattdessen bei x eingesteckt; die Zwitscherei verändert sich.
5. Die Diode D1 wird durch eine Drahtbrücke ersetzt.
6. Bei allen vorangegangenen Experimenten kann zusätzlich P2 verdreht werden, um das Zwitschern zu variieren.

24.2 Spannungs-Frequenz-Wandler

Wir sind in Kapitel 21 ausführlich auf die Unterschiede zwischen digital und analog eingegangen und werden uns erinnern, daß ein Computer (gemeint ist : ein Digitalrechner) nur die Zustände „keine Spannung" oder „Spannung vorhanden" (0 oder 1; High oder Low) auswerten kann. Will man per Computer irgendeinen beliebigen Spannungswert messen, so muß diese (analoge) Spannung zunächst in digitale Signale umgewandelt werden. Eine Möglichkeit dazu bietet ein Spannungs-Frequenz-Wandler; eine Frequenz in Form von Rechteckimpulsen (die periodisch von Low auf High wechseln) kann vom Computer erfaßt werden, indem er während einer festen Zeit, der sog. Zeitbasis, die Anzahl der Impulse auszählt und das Ergebnis dann anzeigt. Vom Spannungs-Frequenz-Wandler muß lediglich gefordert werden, daß Spannung am Eingang und Frequenz am Ausgang proportional zueinander sind.

Bild 345. Aufbau zu Schaltung 346

Das Prinzip der Schaltung 346 ist denkbar einfach: Bei Anlegen einer negativen (!) Eingangsspannung steigt die Ausgangsspannung des Operationsverstärker-Integrators allmählich an. Bei einem bestimmten Wert spricht der Schmitt-Trigger mit T1 und T2 an und kippt. Dadurch wird T3 leitend und schaltet die positive Batteriespannung auf den Eingang des Integrators. Dessen Ausgang sinkt nun sehr rasch wieder ab, bis der Schmitt-Trigger (sein Hysterese-Verhalten ist hier sehr wichtig!) zurückkippt, T3 dadurch wieder sperrt und der Integrationsvorgang von neuem beginnen kann.

Je höher die Eingangsspannung ist, desto schneller läuft die Aufintegration ab, eine desto höhere Frequenz wird also erzeugt. Wir weisen nochmals darauf hin, daß der Pluspol der zu wandelnden Spannung mit der Masse der Schaltung und der Minuspol mit dem Eingang der Wandlerschaltung verbunden werden müssen.
Für die Inbetriebnahme des Aufbaus nach Bild 345 schließen wir eine „Meßspannung" über den Potentiometerschleifer von P2 an den Eingang E, drehen P2 ganz nach rechts und verstellen P1 nun so, daß im Ohrhörer ein hoher Ton hörbar wird. Dieser Ton verändert sich zu niedrigeren Frequenzen, wenn P2 jetzt langsam nach links gedreht wird.

24.3 Elektronisches Thermometer

Wir besprechen jetzt eine Schaltung, die Temperaturwerte in Spannungswerte wandelt, welche uns das Meßinstrument anzeigen kann.
Bild 247 zeigt den Aufbau, Bild 348 die Schaltung, in deren linken Teil wir die bekannte Stromspiegelschaltung mit den Transistoren T1 und T2 erkennen. Die durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Spannungsänderungen am Kollektor von T2 werden auf den Operationsverstärker in invertierender Schaltung gegeben, der sie je nach Einstellung von P1 verstärkt oder abschwächt.

Bild 346. Spannungs-Frequenz-Wandler

Bild 348. Elektronisches Thermometer

Bild 347. Aufbau zu Schaltung 348

Inbetriebnahme des Thermometers: Der Nullpunkt wird zunächst eingestellt, indem T1 in Eiswasser von null Grad Celsius gehalten (siehe Kap.11.15) und P2 so verdreht wird, daß das Instrument null anzeigt. Mit P1 kann nun der „Maßstab" gewählt werden (z.B. 1 Skalenteil = 1 Grad Celsius). Es hängt vom Geschmack jedes einzelnen ab, wieviel Aufwand er an dieser Stelle unter Benutzung eines sehr genauen Thermometers zur Kalibrierung betreiben will. Prinzipiell geht man immer so vor, daß nach dem Nullpunktabgleich die Temperatur, bei der das Instrument Vollausschlag zeigen soll, erzeugt wird (am Thermometer abgelesen) und P1 so eingestellt wird, daß das Instrument auch wirklich den Vollausschlag bringt.

24.4 Vom Phasenschiebergenerator zur Amplitudenmodulation

Kondensatoren sind für Wechselströme durchlässig – das wurde in Kap.12.1 bereits besprochen. Was wir bisher verschwiegen haben: durch ihre Fähigkeit, zeitverzögernd zu wirken, verschieben sie die Phase des Wechselstromes. Das heißt, daß der Nulldurchgang des Stromes hinter einem idealen Kondensator eine Viertelperiode (das entspricht 90 Grad) später vonstatten geht als vor dem Kondensator. Bild 349 zeigt, was damit gemeint ist. Natürlich gibt es keine idealen Kondensatoren, in der Realität ist die Phasenverschiebung aufgrund der Kondensatorverluste immer kleiner als 90 Grad.

Um einen einzelnen Transistor zum Schwingen anzuregen, muß man ihm sein Ausgangssignal um etwa 180 Grad phasenverschoben an der Basis zuführen. Hätte man ideale Kondensatoren, so würden zwei das bewerkstelligen können, in der Praxis jedoch braucht man drei, von denen jeder eine Phasenverschiebung von etwa 60 Grad bewirkt. Genau das tun die Kondensa-

Bild 349. Phasenverschiebung am Kondensator

Bild 350. Aufbau zu Schaltung 351

Bild 351. Erzeugung einer Sinusspannung mit einem Pfasenschiebergenerator und anschließender Amplitudenmodulation

toren *C*1, *C*2 und *C*3 in Schaltbild 351, und damit haben wir ein Gebilde, das uns eine Sinusspannung erzeugt. Die Schaltung heißt **Phasenschiebergenerator**. Solange man die Drahtbrücke Br in Aufbau 350 nicht eingesteckt hat, wird man einen relativ hohen, leisen Ton hören. Die Lautstärke wird vom (Beleuchtungs-) Zustand des Fototransistors bestimmt, den wir hier als veränderbaren Widerstand benutzen: Gesperrter Transistor (wenig Licht) heißt kleine Verstärkung, leitender Transistor (viel Licht) heißt hohe Verstärkung (und natürlich sind alle Zwischenwerte möglich).

Der Operationverstärker rechts in Schaltbild 351 arbeitet als Rechteckgenerator, der nachgeschaltete Transistor liefert genügend Strom für die Infrarotdiode, die periodisch ein- und ausgeschaltet wird, wenn wir die Drahtbrücke Br einstecken. Jetzt wird also die Verstärkung des Verstärkermoduls im Takte des Rechteckgenerators umgeschaltet, am Ausgang erscheinen periodisch kleine und große Amplituden – was wir mit dieser kleinen Schaltung erreicht haben, ist eine perfekte Amplitudenmodulation! (Siehe Bild 352). Wenn man genau hinhört, erkennt man sowohl den hohen Sinuston als auch das summende Geräusch der Rechteckfrequenz.

Experimentieranregungen:

Die Drahtbrücke Br wird herausgezogen und das Licht einer Taschenlampe mehr oder weniger auf

Bild 352. Spannungs-Zeitdiagramm der amplitudenmodulierten Spannung

den Fototransistor gerichtet. Mit der Taschenlampe kann nun die Lautstärke „eingestellt" werden.

Bei eingesteckter Drahtbrücke Br wird für den Kondensator *C*7 mit 0,1 μF ein 1-μF-Kondensator eingesteckt (Plusseite zum OP). Aus dem summenden Geräusch wird jetzt ein „Zwitschern", das durch den Wechsel von lauten und leisen Tönen zustande kommt.

25. Fehlersuche

Wenn eine Schaltung überhaupt nicht gehen will, ist gewöhnlich ein Versehen beim Aufbau schuld. Die Schaltungen selbst arbeiten einwandfrei und sind schon viele Male mit Erfolg aufgebaut worden.
Wenn sich ein Problem ergibt, schlagen wir vor, die folgende Checkliste durchzugehen.

1. Zunächst prüfen, ob die Batterie frisch ist.

2. Untersuchen, ob Dioden, LEDs und Elkos richtig gepolt sind.

3. Überprüfen, ob die Transistoren richtig herum eingesteckt sind.

4. Leicht zu verwechseln sind die Widerstände 10Ω (braun-schwarz-schwarz), 100Ω (braun-schwarz-braun), 1kΩ (braun-schwarz-rot), 10kΩ (braun-schwarz-orange), 100kΩ (braun-schwarz-gelb) und 1MΩ (braun-schwarz-grün) sowie 3,3kΩ (orange-orange-rot) und 33kΩ (orange-orange-orange) sowie auch 150Ω (braun-grün-braun) und 15kΩ (braun-grün-orange), eventuell auch noch 1,2Ω (braun-rot-gold) und 12Ω (braun-rot-schwarz).

5. Sind alle Drahtbrücken richtig eingesetzt? Jedes Teil, das eingesteckt wird, sollte am besten auf dem Aufbaubild durchgestrichen werden. Außerdem vergleicht man, ob alle Stecklöcher so besetzt oder frei sind wie auf dem Aufbaubild.

6. Ob ein Teil kaputt ist, kann man mit der Schaltung prüfen, in der es zum ersten Mal verwendet wurde, sofern es nicht eine eigene Prüfschaltung gibt (z.B. für die Transistoren nach den Bildern 64 bis 69).

7. Manche Bauteile haben u.U. etwas zu lange Anschlußdrähte, die gekürzt werden müssen. Sie stehen sonst unten aus den Steckfedern heraus und können sich berühren, was zu unerwünschten Kurzschlüssen führen kann.

8. Sind die Module mit den ICs richtig herum eingesteckt? Ein verdrehtes IC-Modul erhält u.U. eine verkehrt gepolte Versorgungsspannung, erhitzt sich und geht kaputt.

9. Niemals darf die Isolation eines Anschlußdrahtes mit in die Löcher der Steckfedern eingesteckt werden (kein Kontakt!).

Sachregister

Bitte freimachen

An den
KOSMOS-Verlag
Abt. 48
Postfach 640
7000 Stuttgart 1

Ich bitte um Zusendung folgender Bestellscheine:

☐ Elektronik X 1000 – X 4000

Sonstige Experimentierkästen:

....

Absender: (Bitte in Druckschrift)

Vorname, Zuname

Straße, Hausnummer

PLZ, Ort

Isolierplatte für MW-Modul

Isolierplatte für Verstärker-Modul

Isolierplatte für UKW-Modul

Isolierplatte für OP-Modul

Diese Teile sauber ausschneiden und als Isolierplatte unter den Modulen verwenden.

Ersatzteilbeschaffung
Sofern defekte oder verlorengegangene Teile nicht über den örtlichen Fachhandel zu bekommen sind, können sie bei **KOSMOS, Abt. Ersatzteile, Postf. 640, 7000 Stuttgart 1,** nachbezogen werden.
Wichtig! Bestellschein vorher mit Postkarte beim Verlag anfordern. Ersatzteillieferungen ohne Bestellschein können leider nicht ausgeführt werden.

Heute Abenteuer – morgen Chance: Comp~~u~~etent mit Kosmos!

Cassetten-Interface
Alle Programme, die in den Computer eingegeben werden, können mit diesem Baustein auf Tonband gespeichert werden. Über die Normbuchse läßt sich ein Cassetten-Recorder oder ein anderes Tonbandgerät anschließen. Mit Anleitung.
Bestell-Nr. 61 2211

Speichererweiterung
Mit diesem Zusatz wird die Kapazität des Arbeitsspeichers so erweitert, daß doppelt so lange Programme verwirklicht werden können. Der Erweiterungsbaustein enthält zusätzlich eine Elektronik-Einheit, welche die Anzahl der Eingangs-Ausgangs-Steuerleitungen von 16 auf 38 erhöht. Damit lassen sich dann noch umfangreichere Prozeßsteuerungen aufbauen. Begleitbuch mit weiteren reizvollen Programmbeispielen.
Bestell-Nr. 61 2111

Relais-Interface
Problemlos steuern mit dem Kosmos-Computer: Weichen, Signale, Entkupplungsgleisstücke, Beleuchtungsanlagen, Blockstrecken der Gleisanlage von Modellbahnen (Gleich- oder Wechselstrombetrieb), Hubmagneten Motoren, Lampen, Modelle aus Experimentier- und Konstruktionskästen, Einrichtungen für Foto- oder Filmkameras, Alarm-, Überwachungs- und Kontrollgeräte für Kleinspannung (max. 24 V) können mit Hilfe des Kosmos Relais-Interfaces computergesteuert ein- und ausgeschaltet werden. Das Kosmos Relais-Interface enthält 8 transistorbetriebene Relais sowie 8 elektronische Filter zur wirksamen Unterdrückung von elektrischen Störimpulsen aus dem Fahrbetrieb von Modellbahnen oder auf langen Leitungen, die von Sensoren zum Computer führen. Ausführliche Anleitung mit speziellem Testprogramm.
Bestell-Nr. 61 2411

Ein/Ausgabe-Universal-interface
Neue Spiele, reizvolle Experimente und perfekte Simulation von Steuerungsvorgängen ermöglicht das Ein/Ausgabe-Universalinterface. Es enthält 8 Transistor-Verstärkerstufen mit 8 Leuchtdioden, die die Wirkung der Computer-Ausgabe-Befehle sofort sichtbar machen, sowie 8 Schalter, die eine Fülle von Experimenten zur Dateneingabe erlauben. Die Ausgänge der Transistor-Verstärkerstufen sind außerdem für weitere Computeranwendungen herausgeführt.
Ausführliche Anleitung mit Test- und Spielprogrammen.
Bestell-Nr. 61 2311

Kosmos Computer-Praxis

Der komplette, funktionstüchtige Kompaktcomputer zum Experimentieren, Spielen und Lernen. Mit Kosmos Computer-Praxis kann jeder auf vergnügliche Weise kennenlernen, was ein Computer ist und wie er arbeitet! Der Kosmos-Computer läßt sich besonders gut auch als Kleinprozeßrechner in der Praxis einsetzen und kann auf einfache Weise an diverse Elektronik-Schaltungen angeschlossen werden. Mit dem umfangreichen Begleitbuch wird ein völlig neuer Weg zum leichten Verständnis eingeschlagen: Schritt für Schritt führt es in die Bedienung, Programmierung und Anwendung des Computers ein. Handfestes Computerwissen wird spielerisch durch eine Fülle von Programmbeispielen und Übungsaufgaben vermittelt (Computer-Mondlandung, Modellbahnsteuerung, Nim-Spiel, Code-Knacker, Morse-Automat, Digital-Uhr, Pulsmesser, Melodien-Generator, Digitalvoltmeter usw.) Ideal kombinierbar mit allen Kosmos-Elektronikkästen!
Bestell-Nr. 61 2011
Falls zur Stromversorgung kein Modellbahn- oder Experimentiertrafo vorhanden ist, steht das spezielle **Kosmos Computer-Netzanschlußgerät** zur Verfügung.
Bestell-Nr. 61 2711

Im Spielwaren- und Hobby-Fachhandel und in den Fachabteilungen der Warenhäuser erhältlich!

Farbe			1. Ring (1. Ziffer)	2. Ring (2. Ziffer)	3. Ring (Zahl der Nullen)	4. Ring (Toleranz)
schwarz	sw		0	0	–	–
braun	br		1	1	0	± 1%
rot	rt		2	2	00	± 2%
orange	or		3	3	000	
gelb	ge		4	4	0 000	
grün	gn		5	5	00 000	
blau	bl		6	6	000 000	
violett	vt		7	7		
grau	gr		8	8		
weiß	ws		9	9		
		ohne Ring				± 20%
Manchmal		gold			× 0,1	± 5%
auch:		silber			× 0,01	± 10%

0 mm 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Schaltzeichen

- pnp-Transistor
- npn-Transistor
- Fototransistor
- Feldeffekttransistor
- Diode
- Leuchtdiode
- Widerstand
- Potentiometer
- Kondensator
- Elektrolytkondensator
- Spulen mit Kern
- Ohrhörer
- Lautsprecher
- Meßinstrument
- Leitungskreuzung ohne Verbindung
- Leitungsabzweigung mit leitender Verbindung
- Leitungskreuzung mit leitender Verbindung
- Leitungsende mit Klemme
- Schalter
- Umschalter
- Taster
- Antenne
- Erde
- Batterie
- Gleichstrom
- Wechselstrom
- Operationsverstärker
- Verstärker-Modul
- UND-NICHT-Gatter (NAND-Gate)